

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Sovulj**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Ivan Sovulj

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na vodstvu i pomoći tijekom izrade rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i podršci tijekom mog studiranja. Posebno roditeljima koji su mi omogućili bezbrižno studiranje i bili najveća potpora.

Ujedno bih se zahvalio djelatnicima tvrtke Velum nautica d.o.o. na pomoći pri izradi uzoraka za ispitivanje, te na stečenom praktičnom znanju.

Ivan Sovulj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Sovulj**

Mat. br.: 0035161434

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ISPITIVANJE SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **TESTING THE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali predstavljaju nezaobilazan materijal u izradi novih brodova, ali i u popravcima postojećih. Međutim, u primjeni je vrlo čest slučaj da se kompozitni materijali za popravke brodova u brodogradilištima izrađuju iskustveno i da su dobivena mehanička svojstva nedovoljno poznata.


Stoga je u ovom radu potrebno izraditi uzorke kompozitnih materijala koristeći tehnologije ali i materijale ojačala i matrice koje se najčešće koriste za popravke brodova u praksi. Iz dobivenih uzoraka potrebno je izraditi epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava, te provesti ispitivanja.

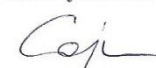
Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o utjecaju tehnologije izrade i korištenih materijala na svojstva kompozitnih materijala korištenih za popravke brodova.

Zadatak zadan:  
4. listopada 2012.

Rok predaje rada:  
6. prosinca 2012.

Predviđeni datum obrane:  
12. – 14. prosinca 2012.

Zadatak zadao:  
  
Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	VII
1. UVOD .....	1
2. PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA.....	3
3. POLIMERNI KOMPOZITNI MATERIJALI .....	5
3.1. Svojstva polimernih kompozita .....	5
3.2. Duromerne matrice .....	7
3.2.1. Poliesterske smole .....	7
3.2.2. Vinilesterske smole.....	8
3.2.3. Epoksidne smole.....	8
3.2.4. Fenolne smole .....	9
3.3. Usporedna svojstva .....	9
3.4. Podjela polimernih kompozita s obzirom na vrste ojačavala.....	12
3.4.1. Kompoziti s vlaknastim ojačanjem .....	12
3.5. Materijali ojačala .....	14
3.5.1. Staklena vlakna.....	14
3.5.2. Ugljikova vlakna.....	15
3.5.3. Keramička vlakna .....	16
3.5.4. Aramidna vlakna.....	16
3.5.5. Hibridna vlakna.....	16
3.5.6. Borna vlakna .....	17
3.5.7. Mineralna vlakna .....	17
3.5.8. Vlakna biljnog porijekla .....	17
3.6. Laminati .....	17
3.7. Sendvič konstrukcije .....	18
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	20
4.1. Cilj rada i provođenja istraživanja .....	20

4.2.	Materijali za ispitivanje .....	20
4.3.	Izrada uzoraka .....	21
4.4.	Analiza mikrostrukture .....	25
4.4.1.	Priprema uzorka .....	25
4.4.2.	Kvalitativna analiza mikrostrukture.....	27
4.5.	Statičko-vlačno ispitivanje uzoraka .....	33
	Rezultati ispitivanja su prikazani na sljedećim dijagramima i pratećim tablicama .....	36
4.6.	Usporedba cijene i mase uzoraka.....	45
5.	ANALIZA REZULTATA .....	46
5.1.	Analiza mikrostrukture .....	46
5.2.	Statičko-vlačni pokus.....	46
5.3.	Osvrt na usporedbu cijene i mase .....	47
6.	ZAKLJUČAK.....	49
7.	LITERATURA .....	50
8.	PRILOZI .....	51

## POPIS SLIKA

Slika 1 - Prikaz razlike između heterogenog višefaznog materijala i kompozita [1].....	1
Slika 2 - Prikaz prirodnog i umjetnog kompozita [1].....	2
Slika 3 - Prikaz kompozita s ugljičnom matricom i ugljičnim ojačalom [1] .....	3
Slika 4 - Primjer kompozita s matricom ojačanom dugim usmjerenim vlaknima [1] .....	5
Slika 5 – Dijagram naprezanje – istezanje za vlakno, smolu i polimerni kompozit[2].....	6
Slika 6 - Dijagram deformacije-naprezanja kompozitnih materijala [2].....	10
Slika 7 - Dijagram prekidnog naprezanja-deformacija tri vrste smola [2].....	11
Slika 8 - Raspored vlakana u matrici [3].....	13
Slika 9 - Laminantna struktura kompozita [3] .....	18
Slika 10 - Prikaz sendvič panela [8].....	19
Slika 11 - Ručno dodirno laminiranje [3].....	22
Slika 12 - Materijal potreban za izradu uzoraka .....	22
Slika 13 - Postupak izrade uzoraka .....	23
Slika 14 - Izrada sendvič konstrukcije .....	23
Slika 15 - Posuda sa smolom.....	24
Slika 16 - Izrada uzorka sa staklenim ojačanjem .....	24
Slika 17 - Gotovi uzorci .....	24
Slika 18 - Uzorci polimernih kompozitnih materijala.....	25
Slika 19 - Uzorci nakon skrućivanja .....	26
Slika 20 - Uređaj za brušenje i poliranje (Struers DAP-V).....	26
Slika 21 - Uzorak 1 (povećanje 50x).....	27
Slika 22 - Uzorak 1 (povećanje 100x).....	28
Slika 23 - Uzorak 1 (povećanje 200x).....	28
Slika 24 - Uzorak 2 (povećanje 50x).....	29
Slika 25 - Uzorak 2 (povećanje 100x).....	29
Slika 26 - Uzorak 2 (povećanje 200x).....	30
Slika 27 - Uzorak 3 (povećanje 50x).....	30
Slika 28 - Uzorak 3 (povećanje 100x).....	31
Slika 29 - Uzorak 3 (povećanje 200x).....	31
Slika 30 - Uzorak 4 (povećanje 50x).....	32
Slika 31 - Uzorak 4 (povećanje 100x).....	32
Slika 32 - Uzorak 4 (povećanje 200x).....	33
Slika 33 - Epruveta za statičko-vlačni pokus .....	34
Slika 34 - Uređaj za statičko-vlačno ispitivanje (WPM - EU 40).....	35
Slika 35 – Uzorak 3 .....	35
Slika 36 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.3 .....	36
Slika 37 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.4 .....	36
Slika 38 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.5 .....	36
Slika 39 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.6 .....	37
Slika 40 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.7 .....	37
Slika 41 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.3 .....	38
Slika 42 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.4 .....	38
Slika 43 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.5 .....	38
Slika 44 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.6 .....	39

Slika 45 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.7 .....	39
Slika 46 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.3 .....	40
Slika 47 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.4 .....	40
Slika 48 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.5 .....	40
Slika 49 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.6 .....	41
Slika 50 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.7 .....	41
Slika 51 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.3 .....	42
Slika 52 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.4 .....	42
Slika 53 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.5 .....	42
Slika 54 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.6 .....	43
Slika 55 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.7 .....	43
Slika 56 – Epruvete nakon ispitivanja.....	44
Slika 57 - Prijelomna površina uzoraka 3 i 4 .....	47



## POPIS TABLICA

Tablica 1 - Razultati ispitivanja za uzorak 1: .....	37
Tablica 2 - Rezultati ispitivanja za uzorka 2: .....	39
Tablica 3 - Rezultati ispitivanja za uzorka 3: .....	41
Tablica 4 - Rezultati ispitivanja za uzorka 4: .....	43
Tablica 5 - Usporedba mase i cijene uzoraka:.....	45
Tablica 6 – Usporedba mehaničkih svojstava: .....	47

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
MMC		metalni kompoziti
PMC		polimerni kompoziti
CMC		keramički kompoziti
CCC		kompoziti s ugljičnom matricom i ugljičnim dodatkom
PAN		poliakrilonitril
$L_3$	mm	ukupna dužina epruvete
$L_0$	mm	početna mjerna duljina epruvete
$L$	mm	udaljenost između čeljusti
$b_1$	mm	početna širina epruvete
$b_2$	mm	širina krajeva epruvete
$h$	mm	debljina epruvete
$S_0$	$\text{mm}^2$	ploština početnog presjeka epruvete
$V_1$	$\text{N/mm}^2$	promjena naprezanja
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	vlačna čvrstoća
$F_m$	N	maksimalna sila
$E$	$\text{N/mm}^2$	modul elastičnosti
$A$	%	istezljivost

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisani su neki od kompozitnih materijala koji se koriste pri izradi novih brodova, ali i u popravcima postojećih. U primjeni je vrlo čest slučaj da se kompozitni materijali za popravke brodova u brodogradilištu izrađuju iskustveno i da su mehanička svojstva nedovoljno poznata. Stoga će se u ovom radu izraditi uzorci kompozitnih materijala koji se najčešće koriste u brodogradnji, te provesti ispitivanja njihovih mehaničkih svojstava. Na temelju dobivenih rezultata doneseni su zaključci o kvaliteti tehnologije izrade i svojstvima kompozitnih materijala koji se koriste za popravke brodova.

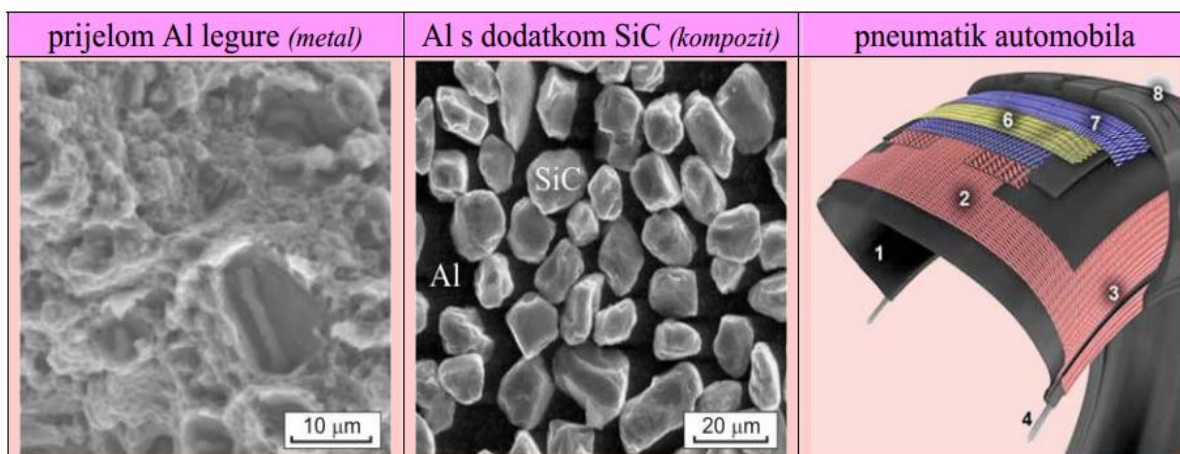
# 1. UVOD

Kompoziti – dobiveni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Cilj je postizanje sinergijskog učinka – boljih svojstava komponenti (npr. čvrstoća, toplinska vodljivost) [1].

Ovakva definicija nije besprijeekorna – u kompozite se ne ubrajaju već obrađeni heterogeni višefazni materijali (formirani faznim transformacijama osnovnog materijala): (a) metalne legure (npr. Fe–FeC<sub>3</sub>), (b) staklokeramike, (c) amorfno/kristali polimeri (npr. PE). S druge strane, u kompozite se ubrajaju strukture koje obuhvaćaju veći broj specifično oblikovanih dijelova [1].

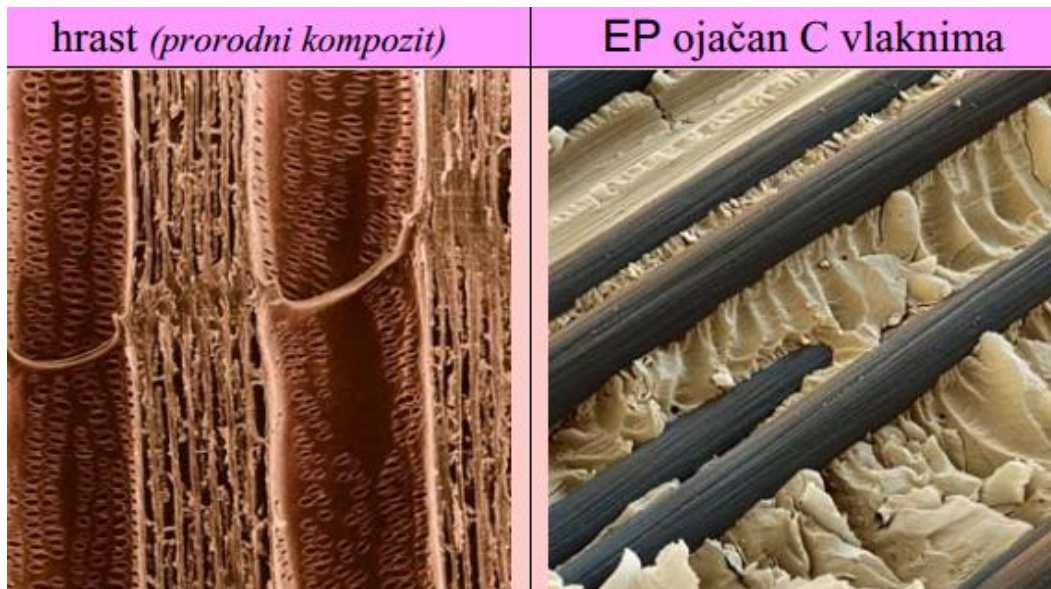
Prema tome, na prvoj razini (najmanje dimenzije konstituenata) kompoziti su heterogene smjese različitih (istih) vrsta materijala (metali, keramike, polimeri), a na drugoj razini (najveće dimenzije konstituenata) heterogene strukture dijelova različitih oblika (od različitih materijala) [1].

Na sljedećoj slici može se vidjeti razlika između heterogenog višefaznog materijala i kompozita.



Slika 1 - Prikaz razlike između heterogenog višefaznog materijala i kompozita [1]

Kompoziti ne pripadaju novim materijalima. Brojni su kompoziti prisutni u prirodi (npr. drvo, ljuštura, kost), a umjetni su kompoziti korišteni još u biblijska vremena – za gradnju nastambi korištene su cigle od blata ojačane slamom. Na slici 2 može se vidjeti primjer prirodnog i umjetnog kompozita.



*Slika 2 - Prikaz prirodnog i umjetnog kompozita [1]*

Gradbene jedinice kompozita su:

- matrica – osnovni materijal
- dodatak – materijal čijim se dodavanjem poboljšava svojstvo matrice (ojačavalo ili punilo)

## 2. PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA

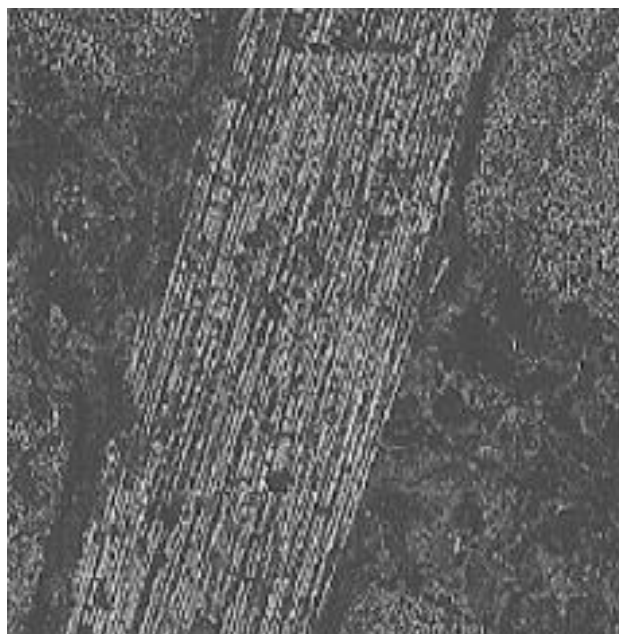
Temeljna podjela kompozita je prema materijalu matrice gdje je: [1]

- velikim početnim slovima naziva vrste materijala matrice (na engleskom jeziku),
- slovom M– matrica (en. matrix),
- slovom C– kompozit (en. composite).

pa prema tome imamo tri glave skupine: [1]

- metalni kompoziti MMC (e. Metal matrix composite)
- polimerni kompoziti PMC (e. Polymer Matrix Composite)
- keramički kompoziti CMC (e. Ceramic matrix composite)

Najčešće primjenjivi kompoziti su kompoziti sa polimernom matricom, rjeđe primjenjivi su kompoziti s metalnom matricom, a kompoziti s keramičkom matricom se rijetko primjenjuju izuzetak je beton. U ovoj podjeli su izostavljeni prirodni i CCC kompoziti. CCC kompoziti, slika 3, su kompoziti s ugljičnom matricom i ugljičnim ojačalom [1].



*Slika 3 - Prikaz kompozita s ugljičnom matricom i ugljičnim ojačalom [1]*

Svakoj od ovi skupina dodaci se dodavaju radi smanjenja nedostataka osnovnog materijala, pa tako metalnoj matrici radi smanjenje trajne deformacije pri višim temperaturama, kompozitima s keramičkom matricom se dodacima povećava žilavost, dok se kod kompozita s polimernom matricom povećava čvrstoća i krutost. [1]

Kompoziti se također mogu dijeliti prema: [3]

- materijalu ojačavala (kompoziti sa staklenim vlaknima ili s metalnim ojačanjem)
- obliku ojačavala (vlaknasti kompoziti, kompoziti sa česticama)
- rasporedu ojačavala (kontinuirani kompoziti, diskontinuirani kompoziti)
- postupku izrade (izravno prešani kompoziti, namotavani kompoziti)
- primjeni (konstrukcijski kompoziti, elektrotehnički kompoziti)

Najviše se koriste kompoziti s polimernom matricom. PM kompoziti su zastupljeni u raznim granama industrijske proizvodnje (automobilskoj industriji, brodogradnji, građevinarstvu, elektrotehnici i elektronici, zrakoplovstvu, vojnoj industriji, te u svemirskim programima) gdje vrlo uspješno zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale.

Prednosti kompozita: [11]

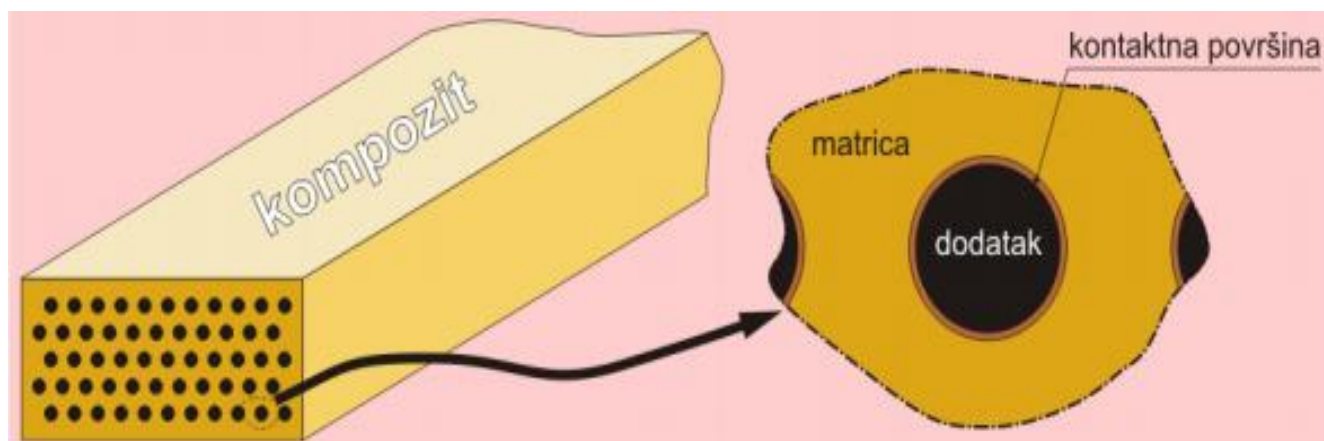
- visoka specifična čvrstoća (odnos čvrstoće i težine)
- specifična krutost
- mogućnost izrade složenih oblika
- otporni na djelovanje korozije
- niska ulaganja u proizvodnu opremu
- trajnost.

### 3. POLIMERNI KOMPOZITNI MATERIJALI

#### 3.1. Svojstva polimernih kompozita

Ponašanje polimernog kompozita ovisi o svojstvima materijala i ojačavala, veličini i rasporedu konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata, prirodi i jakosti veza među konstituentima. Kompoziti mogu istovremeno postići: visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, postojanost na različite medije i druge kombinacije svojstava. Moguća je izrada složenih oblika od polimernih kompozita. Njihovom primjenom dolazi do sniženja troškova naknadne obrade dijelova [3].

Svojstva kompozita su jako specifična zbog toga što ona nisu jednostavan zbroj pojedinih komponenti. Prilikom proizvodnje kompozita potrebno je ostvariti kompatibilnost između matrice i dodatka. Na slici 4 se može vidjeti primjer kompozita ojačanog s dugim usmjerenim vlaknima.



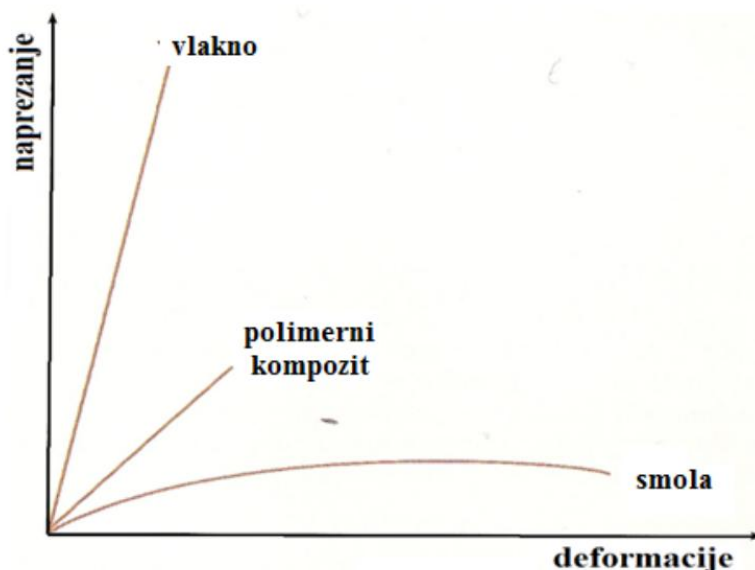
Slika 4 - Primjer kompozita s matricom ojačanom dugim usmjerenim vlaknima [1]

Pravilnim odabirom komponenata dobivaju se specifična svojstva kakva ne posjeduju niti jedna komponenta sama za sebe.

Polimerna matrica raspoređuje opterećenje kompozitnog materijala na svako pojedino vlakno, a ujedno vlakna štiti od oštećenja i udara. Ovakva kombinacija kao rezultat ima dobivanje



materijala visoke čvrstoća i krutosti, male gustoća i dobre postojanosti na atmosferske utjecaje. Na sljedećem dijagramu naprezanje – istezanje, slika 5, mogu se vidjeti pojedinačna svojstva matrice i ojačala te svojstva polimernog kompozita [2].



Slika 5 – Dijagram naprezanje – istezanje za vlakno, smolu i polimerni kompozit[2]

Konačna svojstva kompozita ovisti će o svojstvima vlakana, svojstvima smole, volumnom omjeru vlakana te geometriji i orijentaciji vlakana u kompozitu.

Prednost kompozitnih materijala je ta što se svojstva kompozita mogu kreirati prema želji i potrebama gotovog proizvoda. To znači da prilikom proizvodnje kompozita najprije se odredi namjena kompozitnog materijala i prema opterećenjima i uvjetima u kojima će materijal biti eksploatiran se određuju vrsta matrice (smole) i ojačala (vlakana).

Kemijski sastav polimerne matrice bitno određuje svojstva polimernih kompozita. U primjeni prevladavaju duromerne matrice, prvenstveno one poliesterskog, vinilesterskog i epoksidnog tipa. Različiti tipovi poliesterske matrice uz isto ojačavalo mogu pokazati različita svojstva. Dok je prednost poliestera u dobrim mehaničkim osobinama i lakoj preradi, epoksidi imaju veću kemijsku postojanost, manju kontrakciju volumena i bolja elektrosvojstva. Vinilesteri su po svojstvima između poliestera i epoksida. Lako se prerađuju poput poliestera, a kemijski su postojani skoro kao epoksidi. Za svojstva kompozita važna je ne samo vrsta ojačavala nego i njegova usmjerenost i raspodjela u matrici [2].

Kompoziti gotovo uvijek sadrže šupljine raznih oblika i veličina koje nastaju zbog neuklopljenih mjehurića zraka u viskoznoj fazi smole tijekom izrade ili su posljedica lošeg kvašenja vlakna (npr. uslijed neodgovarajuće viskoznosti matrice). Te šupljine smanjuju svojstva i bitno utječu na djelovanje medija [2].

Mehanizmi postizanja svojstava kompozitnih materijala su: [3]

- **Adicijski efekt**- doprinos pojedine komponente neovisan je o doprinosu drugih (npr. gustoća kompozita je približno srednja vrijednost gustoće njegovih sastojaka proporcionalno njihovim masenim udjelima)
- **Komplementarni efekt**- svaki sastojak doprinosi ostvarenju samo određenog svojstva kompozita (sendvič kompoziti – unutarnji sloj preuzima i prenosi opterećenja, a vanjski slojevi služe primjerice za poboljšanje postojanosti na atmosferske utjecaje)
- **Interakcijski efekt** - konačna svojstva kompozita bolja su nego pojedinačna svojstva njegovih sastojaka - dolazi do sinergističkog djelovanja sastojaka

## 3.2. Duromerne matrice

### 3.2.1. Poliesterske smole

Poliesterska smola je najčešće korištena vrsta smola posebice u brodograđevnoj industriji pri proizvodnji malih plovila. Koristi se mješavina poliestera i monomera, najčešće stirena. Dodatak stirena (do 50%) snižava viskoznost smole i olakšava primjenu (stiren služi za povezivanje molekula polistirena i samim time očvršćuje materijal). Poliesterske smole imaju ograničeni rok trajanja, pa se često u postupku proizvodnje dodaju male količine usporavala. Ova vrsta smole je pogodna zbog svoje niske cijene te relativno dobrih mehaničkih svojstava. U ovisnosti o stupnju polimerizacije kao ishodnim komponentama dobiveni produkti su od tekućine do krutine. Također ove smole se koriste za proizvodnju pjena, adheziva, premaza za drvo, metale, plastifikatore i vlakna, u građevinarstvu osnovne sirovine u proizvodnji

zasićenih poliestera su adipinska kiselina, ftalna kiselina, dimerna kiselina, glikoli i trioli [2,3].

Poliesterske smole spadaju u duroplaste te se tako odlikuju postojanošću na višim temperaturama te su dimenzionalno stabilne za razliku od termoplasta. Pogodne su zbog toga što se mogu prerađivati i pri sobnoj temperaturi što u mnogome pojednostavnjiva njihovu primjenu [2,3].

Dodatkom staklenih ojačala, tzv. armiranjem mogu se postići izvredna mehanička svojstva uz malu specifičnu težinu što se rijetko može postići s ostalim materijalima. Poliesterski kompoziti ojačani sa staklenim vlaknima slabo provode toplinu. Često se koriste kao antikorozivni materijali zbog svoje kemijske postojanosti i postojanosti prema atmosferilijama [2,3].

### **3.2.2. Vinilesterske smole**

Ove smole također spadaju u grupu duroplasta, to su zapravo epoksi vinilesterske smole otopljene u monomeru. Ove vrste smola spadaju u relativno novije generacije smola, a odlikuju se visokom reaktivnošću, dobrom preradom i dužim rokom trajanja. Osiguravaju visoku postojanost na široki spektar kiselina, lužina i otapala i visoku toplinsku postojanost oblika. Zato se pretežno koriste za potrebe procesne industrije [2,3].

Prerađuju se kao poliesteri ručnim postupkom, postupkom raspršivanja (špricanja), namatanja, injektiranja (RTM) kao i pultruzijom [2,3].

Po svojstvima se nalaze između poliestera i epoksida. Iako se prerađuju kao poliesteri (na sobnoj temperaturi), kemijska postojanost im je na razini epoksida [2,3].

### **3.2.3. Epoksidne smole**

Epoksidne smole su dvokomponentne smole koje otvrdnjavaju na sobnim temperaturama s aminskim otvrdivačem. Ovakav tip smola je pogodan za preradu sa staklenim ojačanjima i punilima. Također ova smola se koristi za laminiranje sa staklenim ojačanjima ali i sa mineralnim i metalnim punilima. Nedostatak ove smole je što su veoma otrovne u dodiru s kožom i očima. U usporedbi sa ostalim (poliesterskim i vinilesterskim) smolama epoksidne smole su značajno skuplje [2,3].

Pokazuju izvrsna mehanička svojstva kada su ojačana staklenim vlaknima i veliku postojanost na atmosferilije i djelovanje agresivnih medija i vode. Najčešća primjena ovih smola je u brodogradnji kod izrade brodskih trupova velike kvalitete zbog toga što dobro prijanjaju za ojačavala i postojane su na utjecaj vlage [2,3].

#### **3.2.4. Fenolne smole**

Fenolne smole su toplinski postojane, samogasive, tvrde i imaju povišenu postojanost prema utjecaju organskih otapala i kiselina. Pri umreživanju otpuštaju veliku količinu hlapljivih tvari, što nepovoljno utječe na mehanička svojstva smole kao matrice [2,3].

Relativno su krhke i slabijih mehaničkih svojstava od epoksidnih i poliesterskih smola.

### **3.3. Usporedna svojstva**

U ovoj točki se uspoređuju smole koje su korištene u eksperimentalnom dijelu ovog rada, a to su poliesterske, vinilesterske i epoksidne smole.

#### *Adhezijska svojstva:*

Zbog dobrih adhezivnih svojstava epoksidne smole koriste se u konstrukciji sendvičastih materijala gdje je zbog malog kontakta jezgre i laminata potrebna velika adhezija. Epoksidne smole se koriste kao ljepila s velikom adhezijom. Prilikom polimerizacije epoksidne smole pokazuju najmanje skupljanje volumena, pa površinski kontakt između tekuće smole i ojačanja nije značajno poremećen. Najmanju adheziju stvaraju poliesterske smole sa ojačanjima, a vinilesterske nešto veću [2].

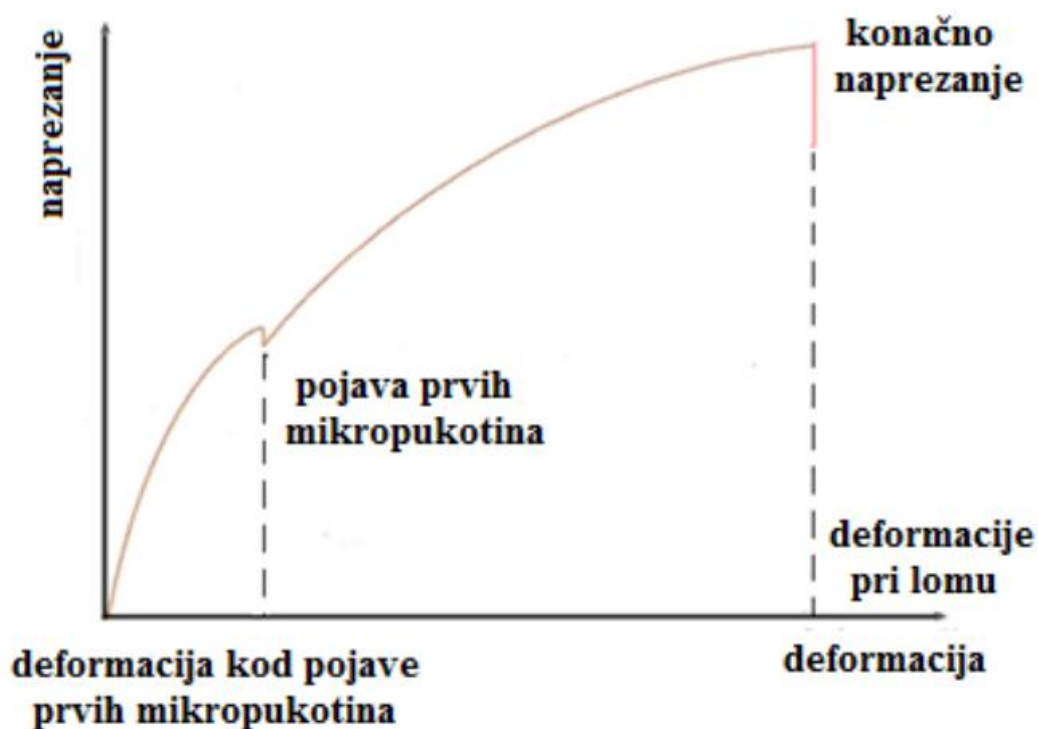
#### *Mehanička svojstva:*

Najbolja mehanička svojstva (vlačna čvrstoća i krutost) imaju epoksidne smole, zatim vinilesterske pa poliesterske smole [2].

#### *Otpornost na stvaranje mikropukotina:*

Pojavom poprečnih mikropukotina počinje proces pucanja. Porastom opterećenja dolazi do pojave sitnih pukotina u matrici koje se šire duž vlakana koja nisu u ravnini s opterećanjem. Prilikom projektiranja kompozitnih materijala treba se paziti da naprezanja u materijalu ne

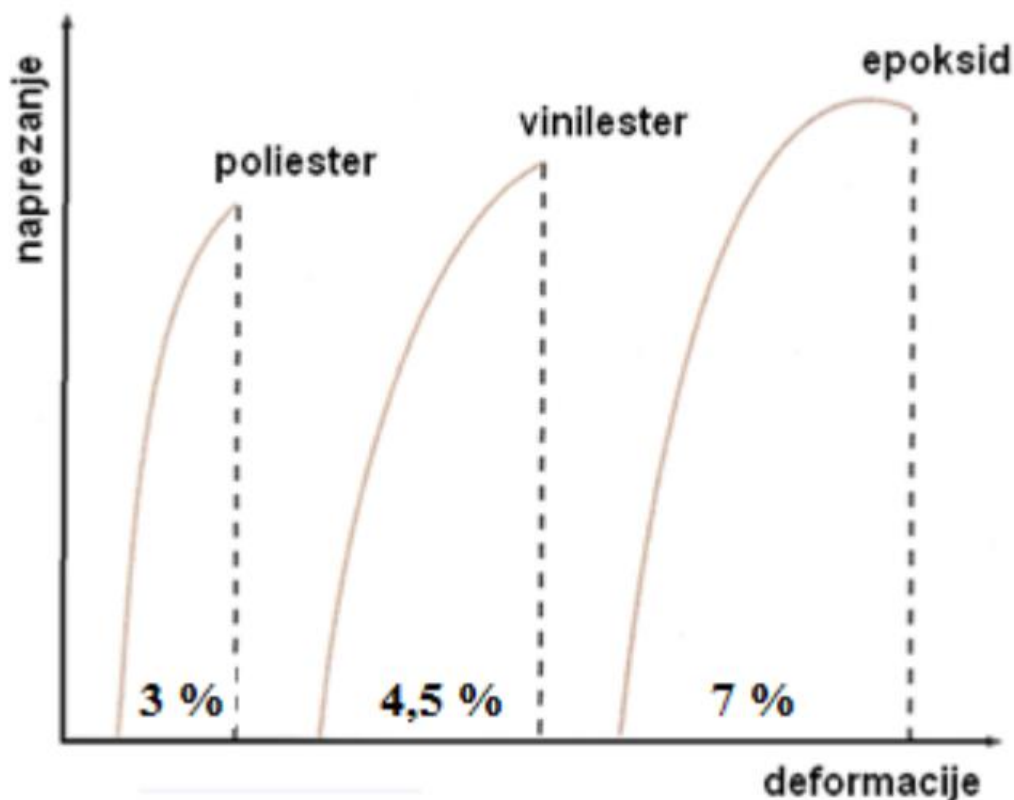
pređu iznos kod kojeg se javljaju mikropukotine, slika 6, dijagram naprezanje – istezanje kompozitnih materijala [2].



*Slika 6 - Dijagram deformacije-naprezanja kompozitnih materijala [2]*

Mikropukotine ne smanjuju odmah svojstva kompozitnog materijala zbog toga što ona ovise o čvrstoći vlakana. Problem mikropukotina se javlja kod konstrukcija koje se koriste u medijima kao što su voda i more zbog toga što laminat s mikropukotinama absorbira puno više vode od neoštećenog laminata. Absorpcija vode dovodi do povećanja težine konstrukcije, hidrolize smole, gubitka krutosti i konačno do pada graničnih svojstava [2].

Ovaj problem se može spriječiti povećanjem adhezije između vlakana i smole. Povećanje adhezije se postiže odgovarajućim kemijskim sastavom smole i njenom kompatibilnošću s površinskim kemijskim premazima vlakana. Zbog toga epoksidne smole imaju najbolja svojstva prilikom izrade konstrukcija koje se koriste u vodi i moru [2].



Slika 7 - Dijagram prekidnog naprezanja-deformacija tri vrste smola [2]

#### *Otpornost na umor:*

U usporedbi s većinom metala kompoziti imaju mnogo bolju otpornost na umor. Zamor nastaje postupkom akumulacije malih oštećenja te će otpornost na zamor kod kompozita ovisiti o tvrdoći smole, njenoj otpornosti na mikropukotine i količini šupljina koje nastaju kao posljedica proizvodnog procesa.

Prema ovome je vidljivo da su epoksidne smole otpornije na zamor u usporedbi sa poliesterskim i vinilesterskim smolama [2].

#### *Otpornost na bubrenje:*

Zahvaljujući svojoj kemijskoj građi epoksidne smole kada su izložene djelovanju vode su otpornije na bubrenje od poliesterskih i vinilesterskih smola. Poliesterski laminat uronjen u vodu, u periodu od godine dana zadržati će samo 65 %, a epoksidni laminat 90 % svoje interlaminarne smične čvrstoće (ILSS). [2]

### **3.4. Podjela polimernih kompozita s obzirom na vrste ojačavala**

Prema vrsti ojačavala kompoziti mogu biti: [3]

- kompoziti s vlaknastim ojačanjima (nositelji mehaničkih svojstava su vlakna)
- kompoziti s dispergiranim česticama (nositelj mehaničkih svojstava je matrica)
- hibridni kompoziti (s vlaknima i dispergiranim česticama)

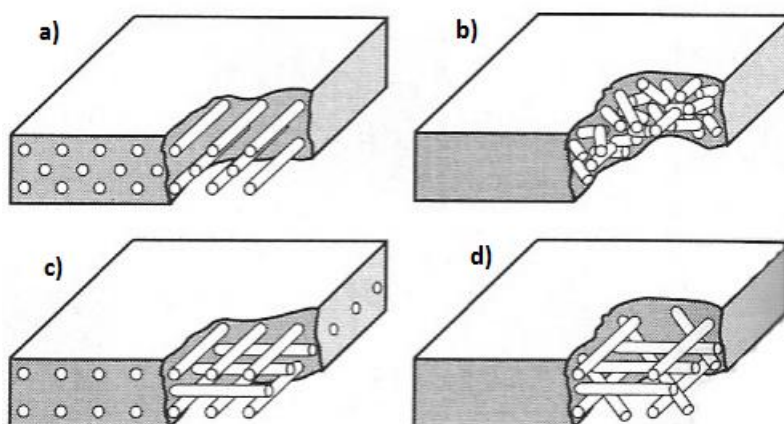
#### **3.4.1. Kompoziti s vlaknastim ojačanjem**

Vlakana nose opterećenje, a zbog njihove visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine. Razlikuju se prema: vrsti materijala, duljini, promjeru, orijentaciji i hibridizaciji. S obzirom na duljinu i orijentaciju vlakana dijele se na kompozite s kratkim vlaknima, one s dugim jednosmjerno orijentiranim vlaknima i one s dugim višesmjerno orijentiranim vlaknima (najveća djelotvornost ojačavala) [3].

Viskeri su vrlo tanke niti monokristala koje posjeduju izvrsna mehanička svojstva zbog pravilne kristalne strukture. Imaju velik omjer duljina/promjer. Mogu biti od grafita (ugljika), SiC, SN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Niti su vlakna u užem smislu, imaju izvrsna mehanička svojstva ali su izrazito anizotropna (u smjeru vlakana čvrstoća materijala je vrlo često i do nekoliko puta veća nego okomito na vlakna) [3].

Promjeri vlakana mogu biti u rasponu od 1μm do 1mm dok volumni udio vlakana u kompozitu može iznositi više od 70%. Na slici 8 se može vidjeti različiti raspored vlakana u matrici.



Slika 8 - Raspored vlakana u matrici [3]

Na primjeru a) sa sl.8 možemo vidjeti kontinuirana jednosmjerno usmjerena vlakna kod kojih se dobiva anizotropna svojstva vlakana. Sa tako usmjerenim vlaknima dobivaju se izvrsna mehanična svojstva u smjeru usmjerenosti vlakana. Na primjerima b) i c) sa sl.8 može se vidjeti kompozit sa izraženijim izotropnim svojstvima. Primjer d) sl.8 prikazuje višesmjerno usmjerena vlakna.

Prednosti vlaknastih polimernih kompozita su: [3]

- znatno više specifične čvrstoće i krutosti
- relativno niska cijena proizvodnje i obrade
- velika mogućnost prigušenja vibracija

Nedostaci vlaknastih polimernih kompozita su: [3]

- osjetljivost na raslojavanje i mrvljenje
- mogućnost širenja pukotina duž vlakna
- napetosti izazvane skupljanjem matrice pri i nakon proizvodnje tvorevine
- anizotropnost svojstava



### **3.5. Materijali ojačala**

Vlaknasta ojačavala moraju ispunjavati uvjet čvrstoće, modula elastičnosti, kompatibilnosti s matricom, gustoće, kemijske postojanosti, nekorozivnosti, itd. Općenito vrste vlakana mogu biti: [7]

- prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.)
- staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.)
- ugljična vlakna (Carbon)
- metalna vlakna (žica ili žičano pletivo)

#### **3.5.1. Staklena vlakna**

Najčešće upotrebljavana ojačanja za plastomere i duromerne kompozite. Staklena vlakna se dobivaju raznim tehnološkim postupcima iz staklene taline. Nanošenjem apreture vlakna dobivaju potrebna mehanična svojstva i specifičnu kompatibilnost s različitim smolama za postupke proizvodnje kompozitnih proizvoda [3].

Stakleno ojačanje je najvažnije punilo poliestera jer je ono nosilac mehaničkih svojstava, dok je poliestar zapravo vezivni materijal.

Podjela po kemijskom sastavu i svojstvima: [3]

E – niska električna provodljivost

C – kemijska postojanost

S – visoka čvrstoća

M – visoki modul rastezljivosti

A – alkalijsko staklo

Oko 99% se proizvodi i troši E stakla.

Prednosti upotrebe staklenih ojačanja: visoka čvrstoća, mala težina, dimenzijska stabilnost, postojanost na povišene temperature i koroziju, dobra električna svojstva te relativno jednostavna proizvodnja pa stoga i privlačna cijena [3].

Na tržištu staklo možemo naći u dva oblika, u obliku kontinuiranog rovinga, te tankog isječenog rovinga.

#### *Stakleni mat:*

Stakleni mat je proizvod odsječenog rovinga, sastoji se od staklenih niti dužine oko 5 cm koje su rastresene po površini i postavljene u svim pravcima. Niti su međusobno povezane pomoću ljepila na osnovi sintetskih smola. Razlikuje se po gramaturi na kvadratni metar (100, 225, 300, 450, 600 g/m<sup>2</sup>) kao i vezivo koje može biti emulzijsko ili praškasto na osnovi praškastog poliestera [2].

#### *Multiaksijalna vlakna:*

Multiaksijalna vlakna su nepleteni proizvodi načinjeni od dva ili više slojeva vlakana u različitim smjerovima povezane polieterskim konopcem. Osnovni tipovi multiaksijalnih vlakana su biaksijalna vlakna 0°/90°, biaksijalna vlakna +45°, triaksijalna vlakna 0°/+45°, kvadriaksijalna vlakna 0°/-45°/90°/+45° [2].

### **3.5.2. Ugljikova vlakna**

Ugljikova vlakna se dobivaju kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom ugljikom bogatih organskih predhodnika koji su u vlaknastom obliku. Najčešći takav predhodnik je poliakrilonitril (PAN) koji daje najbolja svojstva vlakana. Vlakna se također mogu još proizvesti i od katrana i celuloze. Podešavanjem parametara tijekom procesa grafitizacije dobivaju se ili vlakna visoke rastezne čvrstoće (pri 2600°C) ili vlakna visokog modula elastičnosti. Također i na ugljikova vlakna se nanosi aparatura kako bi se poboljšalo njihovo prijanjanje uz matricu [3].

Svojstva ugljikovih vlakana: [3]

- najveću krutost od svih komercijalno dostupnih vlakana
- vrlo visoku rasteznu i pritisnu čvrstoću
- odličnu otpornost na koroziju, pužanje i zamor materijala
- koriste se u zrakoplovnoj automobilskoj industriji, za izradu sportske opreme itd.

Pri ugrađivanju ugljikovih vlakana u kompozitne proizvode upotrebljavaju se postupci kao pri primjeni staklenog ojačala: namatanje, pultrudiranje, postupci potlačnog ubrizgavanja.

Kod kompozita gdje se traže visoka mehanička svojstva proizvoda i mala težina koriste se ugljikova vlakna.

### **3.5.3. Keramička vlakna**

Vlakna anorganskog porijekla u različitim oblicima. Njihova primjena je izraženija u posljednjih dvadesetak godina iako su poznata i od prije. Kod kompozita koji su podvrgnuti ekstremnim opterećenjima se koriste zbog visoke toplinske postojanosti te postojanosti na djelovanje vlage. Na tržištu se pojavljuju u sljedećim oblicima: RFC vlakna, Al vlakna, borna vlakna, S i C vlakna [2].

### **3.5.4. Aramidna vlakna**

Aramidna vlakna su sintetski organski polimeri proizvedeni pređenjem kontinuiranog vlakna iz kapljevite smjese. Tako dobivena vlakna imaju tipično zlatno – žutu boju, a karakterizira ih visoka rastezna čvrstoća i niska gustoća. Karakterizira ih postojanost na visoke temperature i relativno mala specifična težina. Raspon temperature pri kojima zadržavaju visoka mehanička svojstva je od -200 do 200°C. Podložna su djelovanju jakih kiselina i baza, ali su postojana na otapala i druge kemikalije [2,3].

Primjenjuju se za izradu dijelova zračnih i svemirskih letjelica, vojnoj industriji, industriji transportnih sredstava, brodogradnji i u proizvodnji predmeta vrhunske sportske opreme. Najpoznatije aramidno vlakno je Kevlar (trgovački naziv za vlakna američke tvrtke DuPont) [2,3].

### **3.5.5. Hibridna vlakna**

Vlakna sastavljena od dva ili više vrsta vlakana. Spajanjem više vrsta vlakana postižu se optimalna svojstva. Najčešće se primjenjuju hibridi ugljik/aramid/stakleno vlakno u brodogradnji i zrakoplovstvu. Upotrebom ovih vlakana proizvodu se poboljšava udarna žilavost, sprječava galvanska korozija i snižuje cijena [2].

### **3.5.6. Borna vlakna**

Ugljikova ili metalna vlakna ponekad se prevlače slojem bora kako bi se poboljšala ukupna svojstva vlakana. Zbog visoke cijene upotreba ovih vlakana ograničena je na djelove zrakoplovne konstrukcije s velikim toplinskim opterećenjima i na specijalizirane sportske proizvode.

Bor/ugljkov hibrid u epoksidnoj matrici ima bolja mehanična svojstva nego bilo koje vlakno pojedinačno [3].

### **3.5.7. Mineralna vlakna**

Glavni predstavnik ove skupine je azbest. Zbog lošeg utjecaja na zdravlje čovjeka njegova primjena je u nekim državama zabranjena usprkos njegovim dobrim mehaničkim svojstvima i niskoj cijeni. Odlikuju se dobrom toplinskom postojanošću, postojanošću na različite kemikalije, prigušuju zvuk, zapaljiva su, pa se pri upotrebi za zaštitu od vatre često miješaju sa cementom, te se pletu u tkanine ili matove [3].

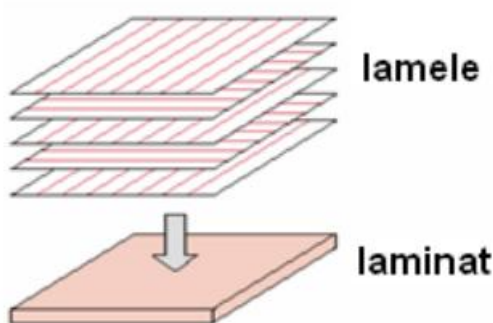
### **3.5.8. Vlakna biljnog porijekla**

Najčešće se koriste drvena vlakna (bor, jasen, hrast), konoplja, juta, vlakna agave, ljuske riže i kukuruza. U usporedbi s ostalim vlaknima ova vlakna imaju znatno manja mehanična svojstva, dok im je prednost niža gustoća, niža cijena te lakše recikliranje. Povećanje njihove primjene u plastomernim kompozitima kao ojačavalo se povećala briga za okoliš [3].

## **3.6. Laminati**

Osnova kompozitne konstrukcije je laminat. Laminati su strukturirani polimerni kompoziti koji kao ojačanje mogu koristiti više vrsta vlakana, koja se ovisno o potrebi laminiraju u predviđenim smjerovima i slojevima. Polimerni laminati su kemijskom reakcijom stvrdnute i vlaknima ojačane epoksidne ili poliesterske smole. Lamele s različito orijentiranim vlaknima

ojačavala slažu se i lijepe međusobno u laminat uz djelovanje tlaka, kao što je prikazano na slici 9, te se tako dobiva laminatna struktura kompozita [3].



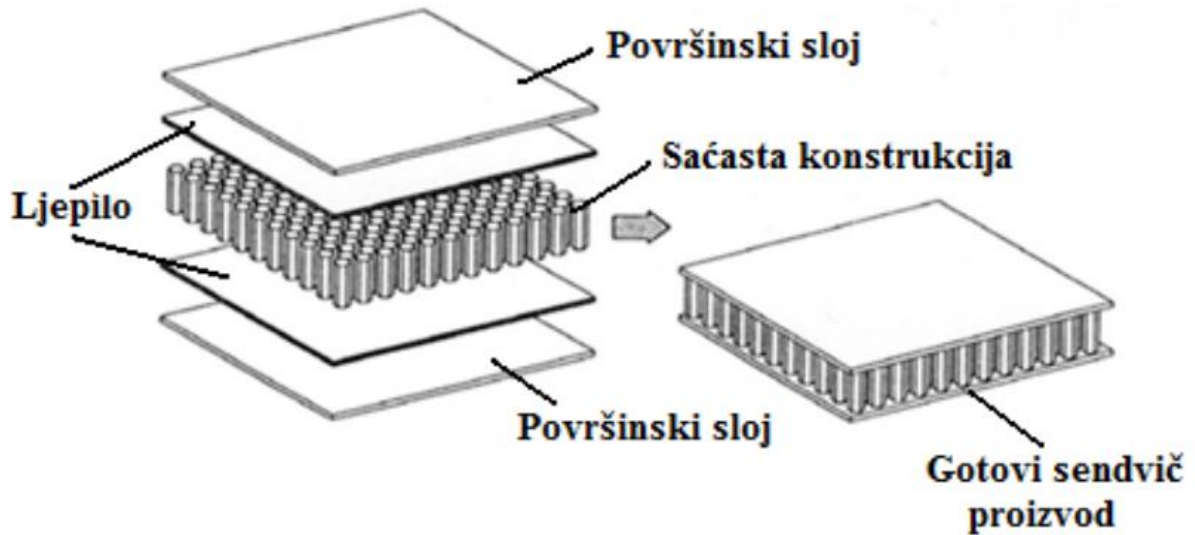
*Slika 9 - Laminantna struktura kompozita [3]*

### 3.7. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije su materijali koji se sastoje od tankih vanjskih slojeva i materijala male mase za popunjavanje. Sendvič konstrukcije su zanimljive zbog toga što niti materijal za popunjavanje, niti površinski sloj ne moraju biti čvrsti i kruti, a sendvič će posjedovati oba ta svojstva. Najčešće su vanjski slojevi načinjeni od materijala veće čvrstoće i krutosti dok materijali za popunjavanje su najčešće porozni (pjensti) polimeri, sintetski kaučuk, balzino drvo itd. Funkcije jezgre su da razdvaja površinske slojeve te se suprostavlja deformiranju u smjeru okomitom na ravninu, te da u određenoj mjeri osigura krutost u ravninama okomitima na površinski sloj. Površinski slojevi nose opterećenja u smjeru ravnine, a također i poprečna naprezanja uslijed savijanja.

U brodogradnji posebno mjesto zauzimaju sendvič konstrukcije na osnovi polimernih materijala. Prednosti ovakvih konstrukcija su krutost, otpornost na umor, žilavost, kemijska postojanost itd. Jedna od najbitnijih prednosti sendvič konstrukcija je smanjenje mase kostrukcije, a samim tim povećanje nosivosti i smanjenje potrošnje goriva broda.

Na slici 10 se može vidjeti jedan primjer nastajanja sendvič panela.



*Slika 10 - Prikaz sendvič panela [8]*

Primjena sendvič konstrukcija svakim danom je sve veća. Sendvič konstrukcije se najviše primjenjuju u zrakoplovnoj industriji (oplate krila, trupa, repa, unutarnje uređenje zrakoplova i sl.), graditeljstvu (krovovi, podovi, pregradne stijenke i sl.), pri gradnji vozila (automobili, kamioni, željeznička vozila) i brodogradnji.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenja istraživanja

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je izrada i karakterizacija kompozitnih polimernih materijala. Karakterizacija je napravljena na četiri različita uzorka. Za matrice kompozitnih polimera su odabrane duromerne smole poliester, vinilester i epoksi smole. Kao ojačavala su se koristila staklena vlakna na prva dva uzorka (Uzorak 1 i Uzorak 2), dok se kod druga dva uzorka (Uzorak 3 i Uzorak 4) kao ojačavala koristila ugljična vlakna. Uzorci 3 i 4 su napravljeni kao sendvič konstrukcije s materijalom *Termant (Ekspandirani PVC-Corex C70 55, 5 mm)* kao punilo. Laboratorijska ispitivanja su provedena na izrezanim uzorcima od gore navedenih materijala. U cilju karakterizacije materijala provedena su sljedeća ispitivanja:

- analiza mikrostrukture:
  - kvalitativna analiza mikrostrukture
- statički vlačni pokus
- usporedba cijene i mase.

### 4.2. Materijali za ispitivanje

Ispitivanja su provedena na izrezanim uzorcima polimernih kompozita slijedećih planova laminata.

Uzorci 1 i 2:

- 1. Poliester FSN 0850/AMT/E (smola)**
- 2. Vinilester-sirester VE 45-M-90/AT (smola)**

Akperox A 50 (katalizator)

**P** – Powder mat 1M-300-125 (praškasti mat 300 gr/m<sup>2</sup>)

**BX** – Biaxial EBX 600 gr/m<sup>2</sup>

*Plan laminacije za obje smole jednak*

- P-300
- P-300
- BX-600
- P-300
- BX-600
- P-300

Uzorci 3 i 4:

**3. Epoxy west system 105 (smola)****4. Vinilester-sirester VE 45-M-90/AT (smola)**

Harter 205 West system (katalizator)

*Plan laminacije za obje smole jednak*

- Ugljična vlakna 400 gr/m<sup>2</sup> 2X
- Termant (Ekspandirani PVC-Corex C70 55, 5 mm)
- Ugljična vlakna 400 gr/m<sup>2</sup> 2X

U daljnjem radu uspoređivat će se uzorci 1 i 2, te uzorci 3 i 4.

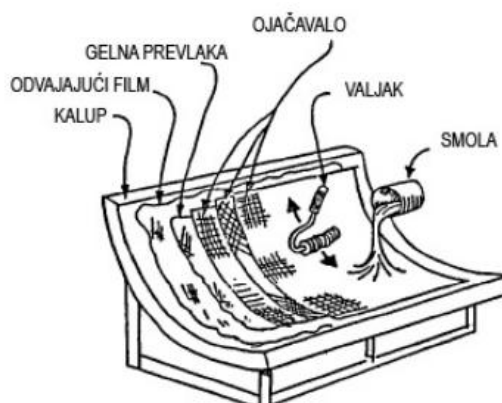
**4.3. Izrada uzoraka**

Postupak izrade uzoraka, gore navedenih planova laminacije, je izveden ručnim dodirnim postupkom. Dimenzije izrađenih uzoraka su 400 x 300 mm. Ukupno je utrošeno materijala:

- 8 x P – 300gr (400x300mm)
- 4 x Bx – 600gr (400x300mm)
- 8 x C – 400gr (400x300mm)
- 2 x Te – 5mm (400x300mm)
- 0.5 kg Poliester FSN 0850/AMT/E (smola)
- 1 kg Vinilester-sirester VE 45-M-90/AT (smola)
- 0,5kg Epoxy west system 105 (smola)



Izrada polimernih kompozitnih materijala je napravljena uz pomoć djelatnika tvrtke Velum nautica d.o.o. Na slici 11 je prikazana shema izrade dijelova ručnim dodirnim postupkom.



*Slika 11 - Ručno dodirno laminiranje [3]*

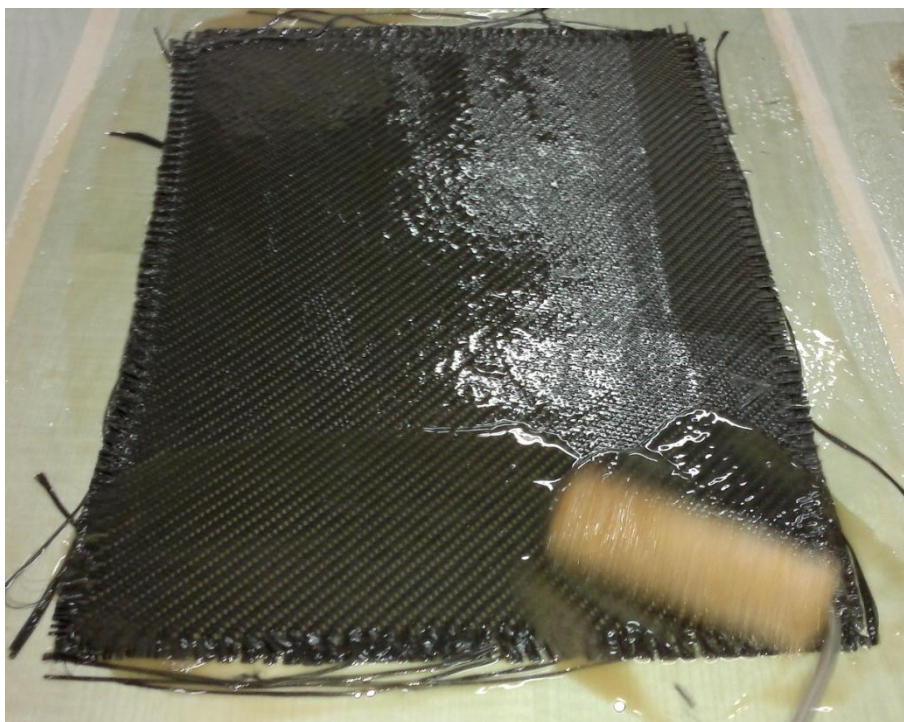
Ovaj postupak se koristi za izradu proizvoda velikih dimenzija u malim serijama. Kod ovog postupka samo je jedna strana glatka i zbog toga se koristi kod izrade brodova, bazena, kalupa, itd.

Prilikom izrade materijala za ispitivanje prvo se nanio premaz za lakše odvajanje, nakon toga se valjkom nanio sloj smole spreman za polireakciju uz umrežavanje, ali bez ojačavala i punila. Zatim su se redom nanosili slojevi ojačavala i punila natopljeni smolom, a valjkom se istiskivao zrak zadržan između slojeva.

Na slikama 12 do 17 je prikazan postupak izrade uzoraka ručnim dodirnim postupkom.



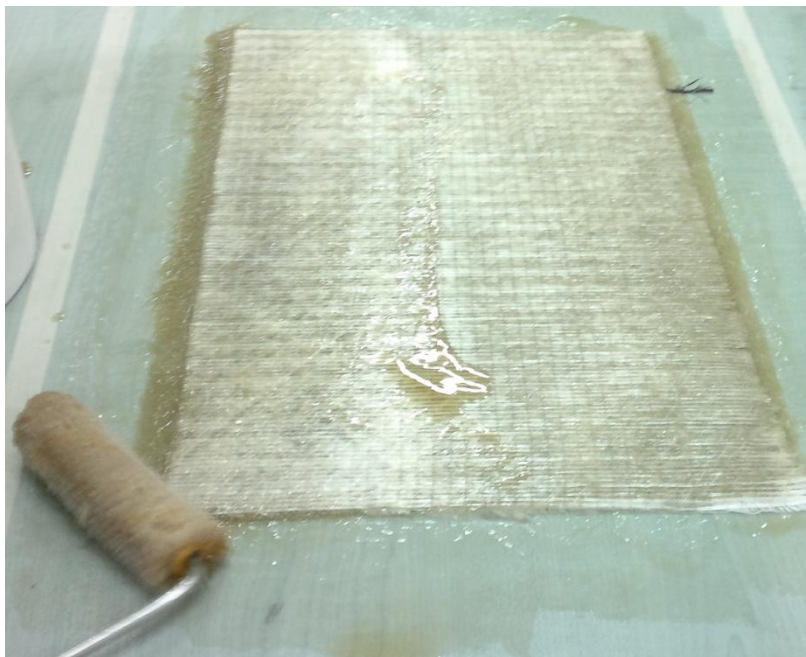
*Slika 12 – Materijal potreban za izradu uzoraka*



*Slika 13 – Postupak izrade uzoraka*



*Slika 14 – Izrada sendvič konstrukcije*



*Slika 15 – Posuda sa  
smolom*

*Slika 16 – Izrada uzorka sa staklenim ojačanjem*



*Slika 17 - Gotovi uzorci*



## 4.4. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

### 4.4.1. Priprema uzorka

Priprema uzoraka obuhvaća točno definirane faze:

#### a. Izrezivanje

Izrezivanje uzoraka je izvedeno električnom ubodnom pilom. Izrezana su četiri uzorka, slika 16:

- **uzorak 1**
- **uzorak 2**
- **uzorak 3**
- **uzorak 4**

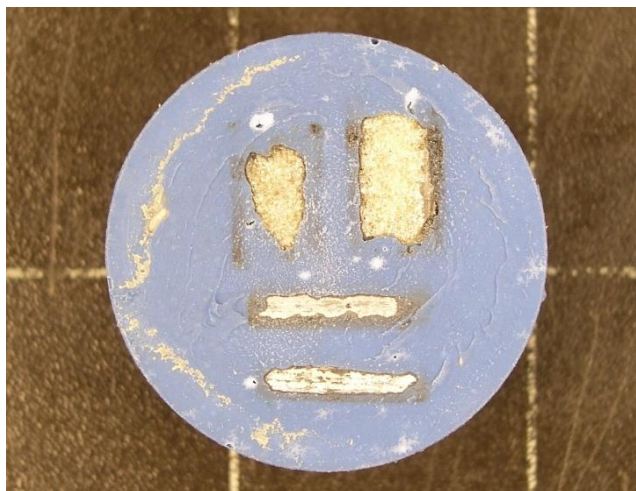
Na slici 18 se vide izrezani uzorci.



*Slika 18 - Uzorci polimernih kompozitnih materijala*

### **b. Ulijevanje**

Ulijevanje se izvodi radi zaštite uzorka te kako bi se olakšalo rukovanje s uzorkom u daljnjem ispitivanju. Ulijevanje je izvedeno u hladnoj masi Varidur 20 (prah + tekućina u omjeru 2:1). Na slici 19 se vide uzorci nakon ohlađivanja i skrućivanja. Svi uzorci su uliveni u isti kalup radi uštede materijala.



*Slika 19 - Uzorci nakon skrućivanja*

### **c. Poliranje**

Poliranje je obavljeno na uređaju marke Struers tipa DAP-V, slika 20.



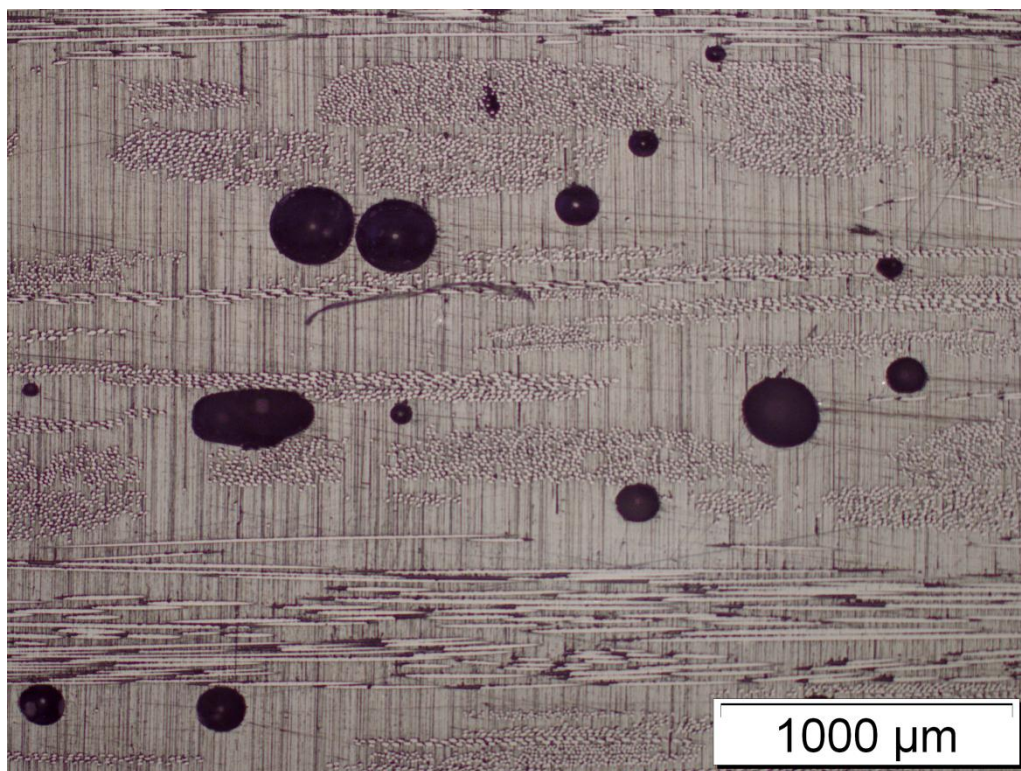
*Slika 20 - Uređaj za brušenje i poliranje (Struers DAP-V)*

#### 4.4.2. Kvalitativna analiza mikrostrukture

Na sljedećim slikama se mogu vidjeti mikrostrukture uzoraka uz povećanja 50x, 100x i 200x.

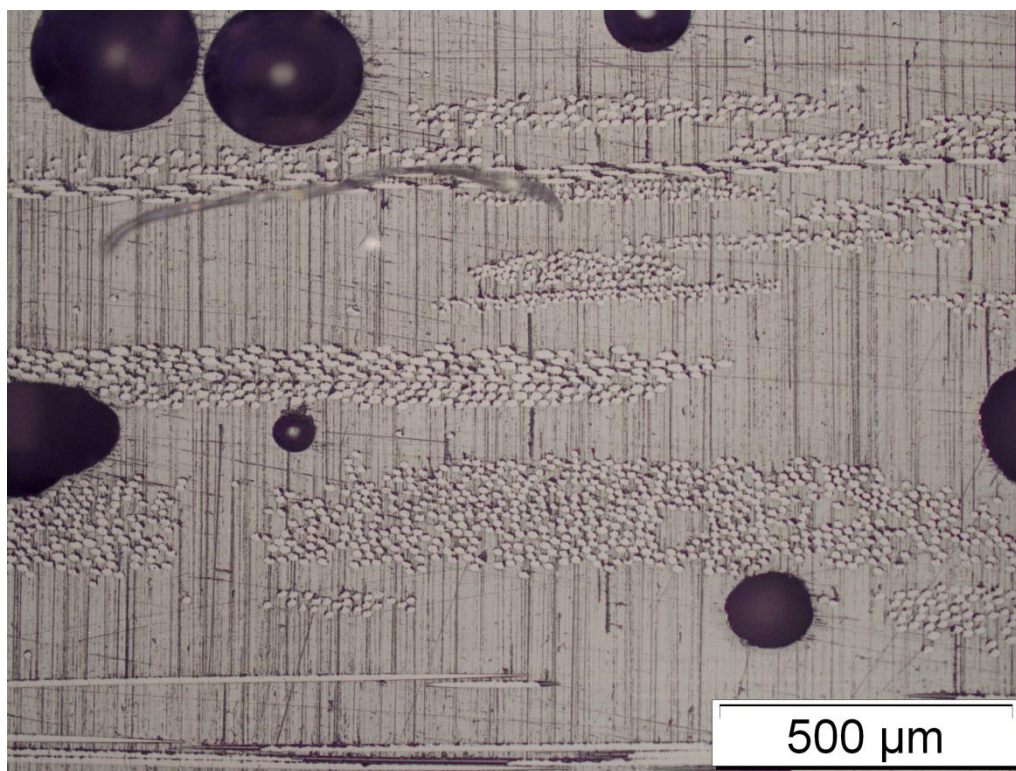
Na slikama uzoraka 1 i 2 vidljivo je da postoji zaostalih mjehurića zraka. Mjehurići zraka su posljedica postupka proizvodnje ručnim dodirnim postupkom.

Na slikama 21 do 32 prikazana je mikrostruktura uzoraka 1, 2, 3 i 4 s tri različita povećanja.

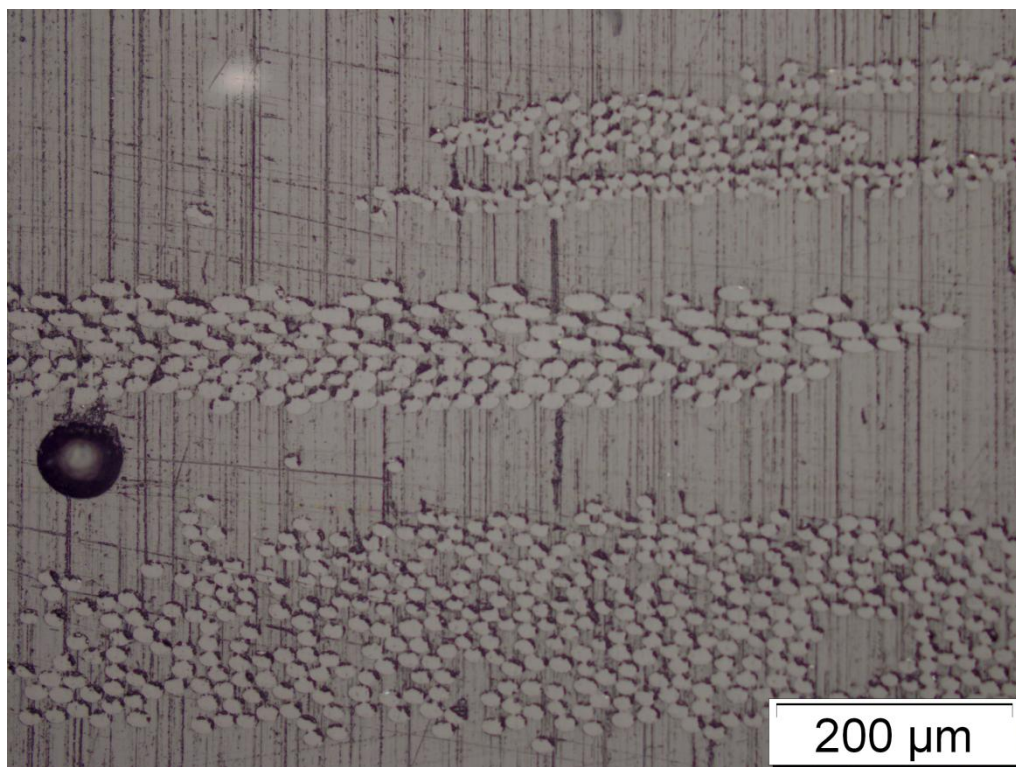


*Slika 21 - Uzorak 1 (povećanje 50x)*



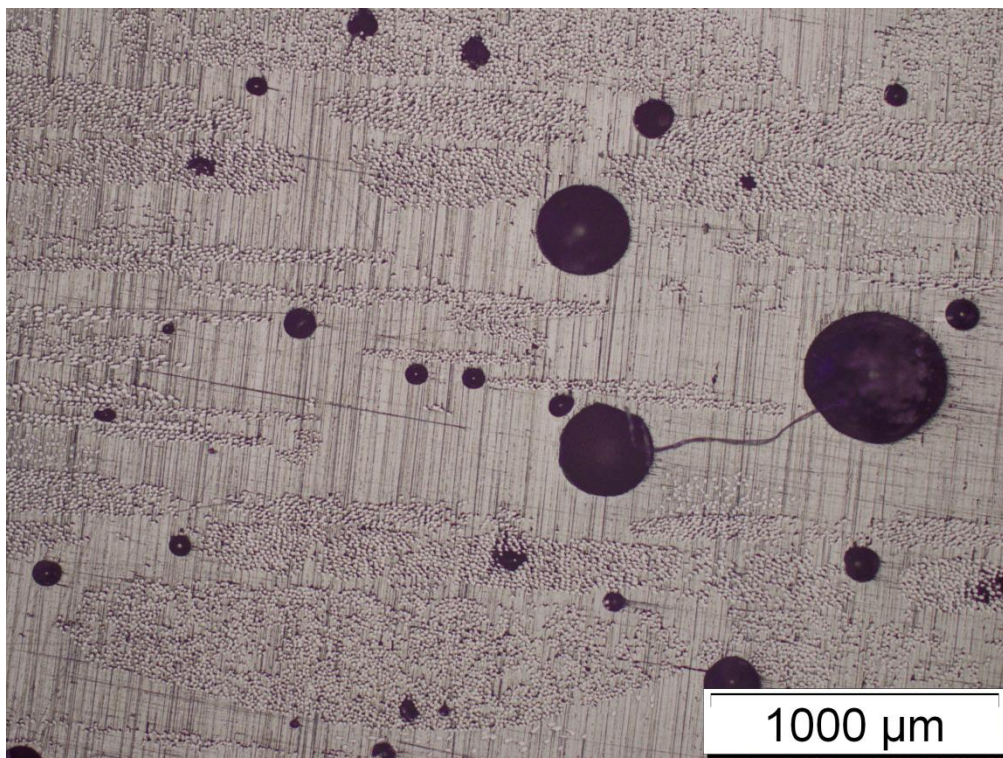


*Slika 22 - Uzorak 1 (povećanje 100x)*

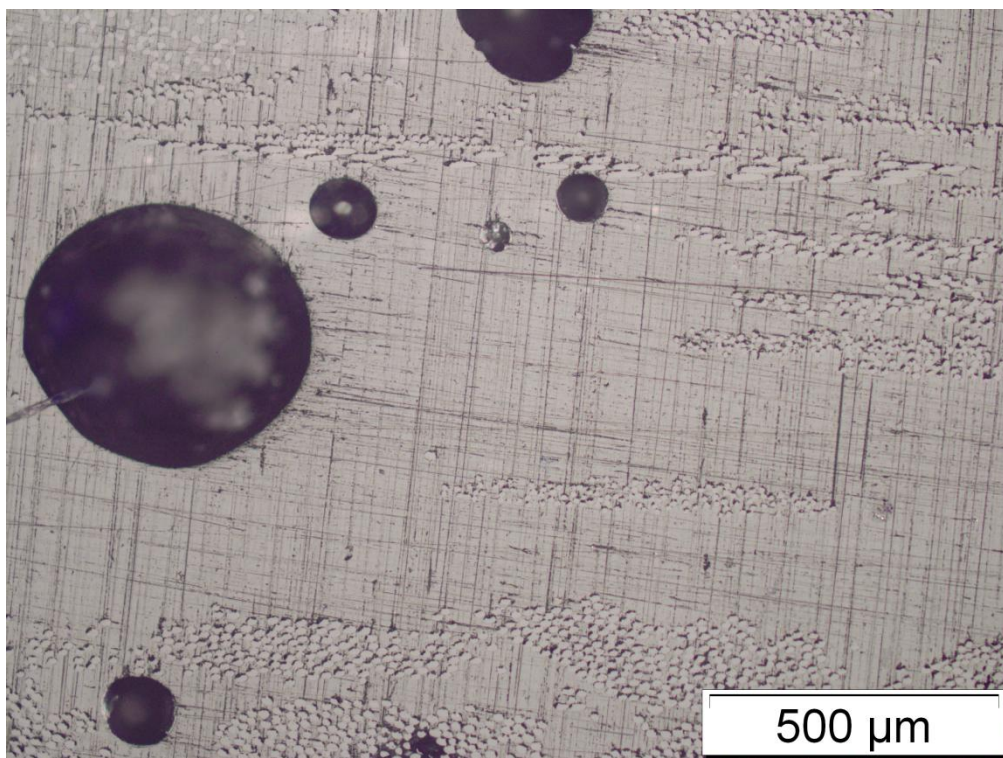


*Slika 23 - Uzorak 1 (povećanje 200x)*



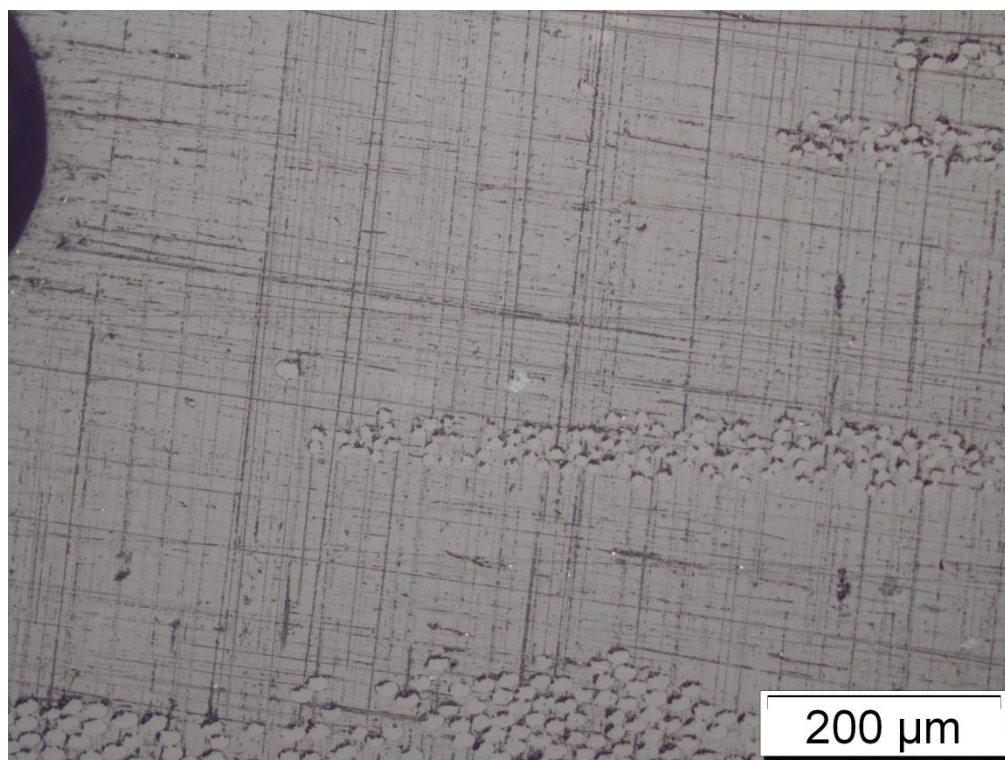


*Slika 24 - Uzorak 2 (povećanje 50x)*

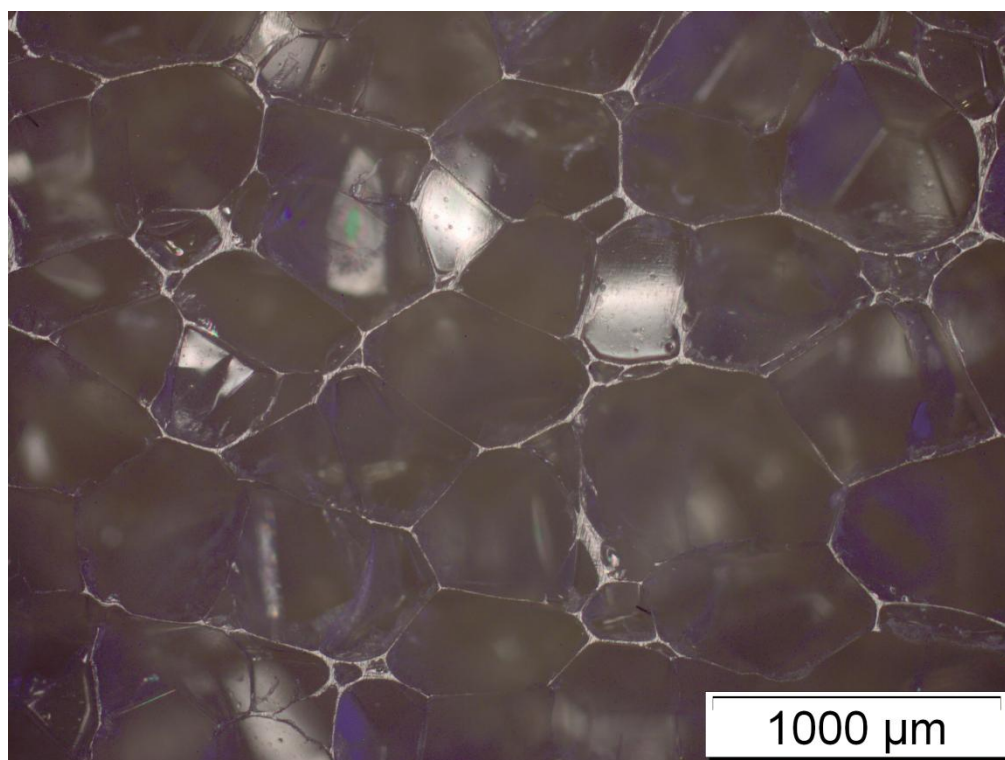


*Slika 25 - Uzorak 2 (povećanje 100x)*

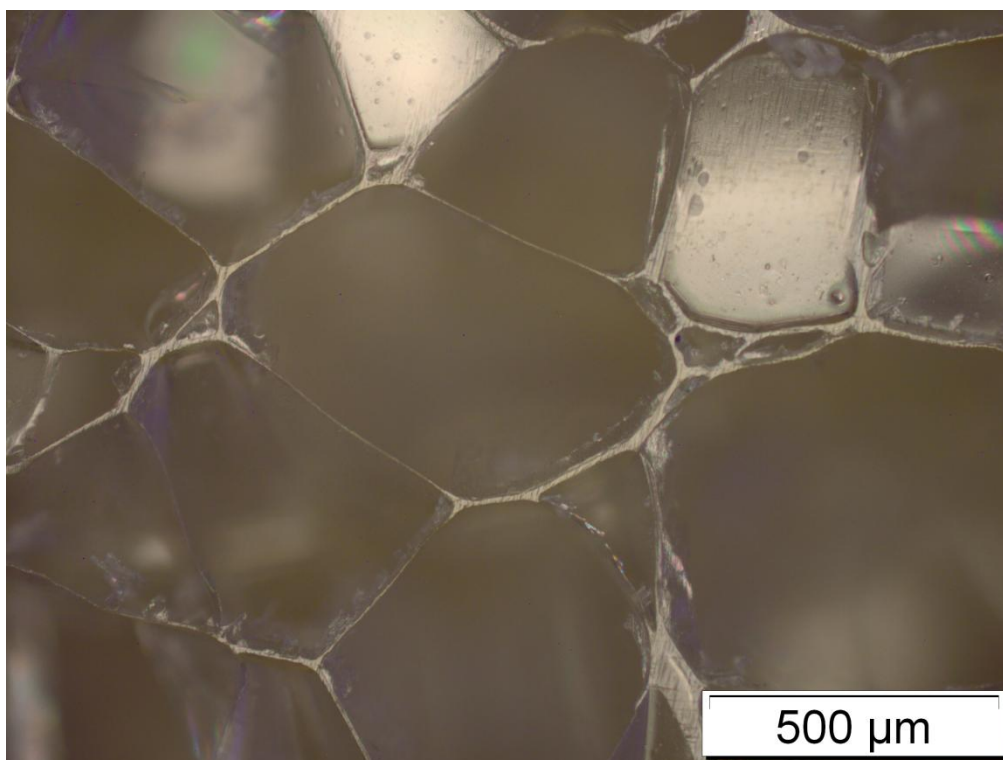




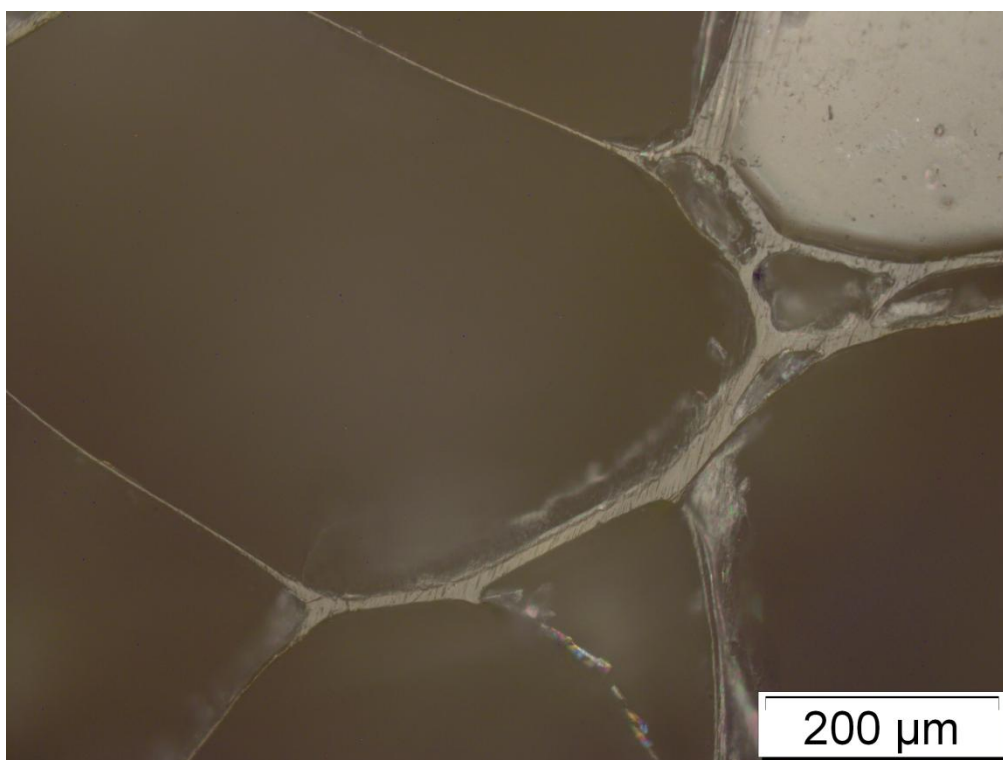
*Slika 26 - Uzorak 2 (povećanje 200x)*



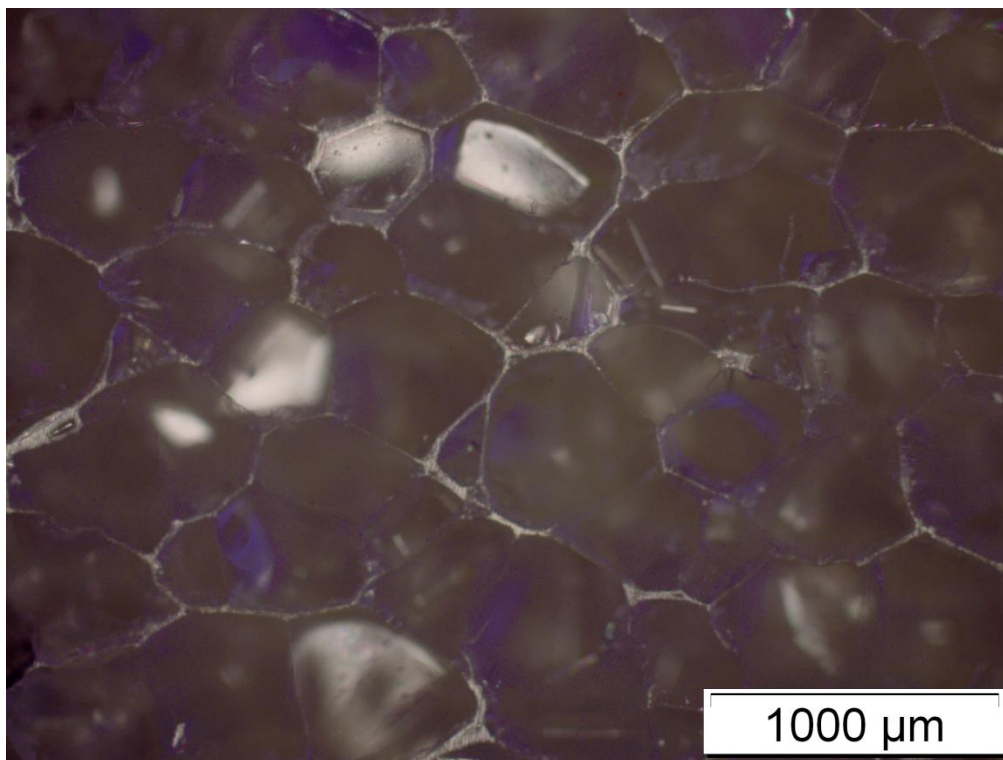
*Slika 27 - Uzorak 3 (povećanje 50x)*



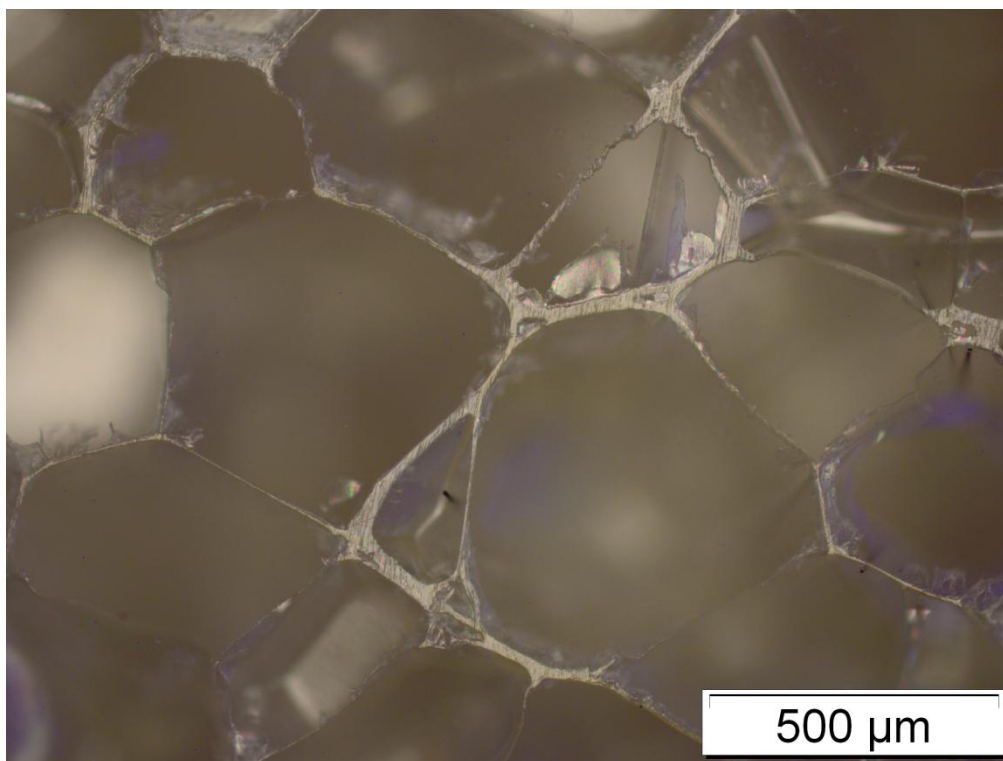
*Slika 28 - Uzorak 3 (povećanje 100x)*



*Slika 29 - Uzorak 3 (povećanje 200x)*

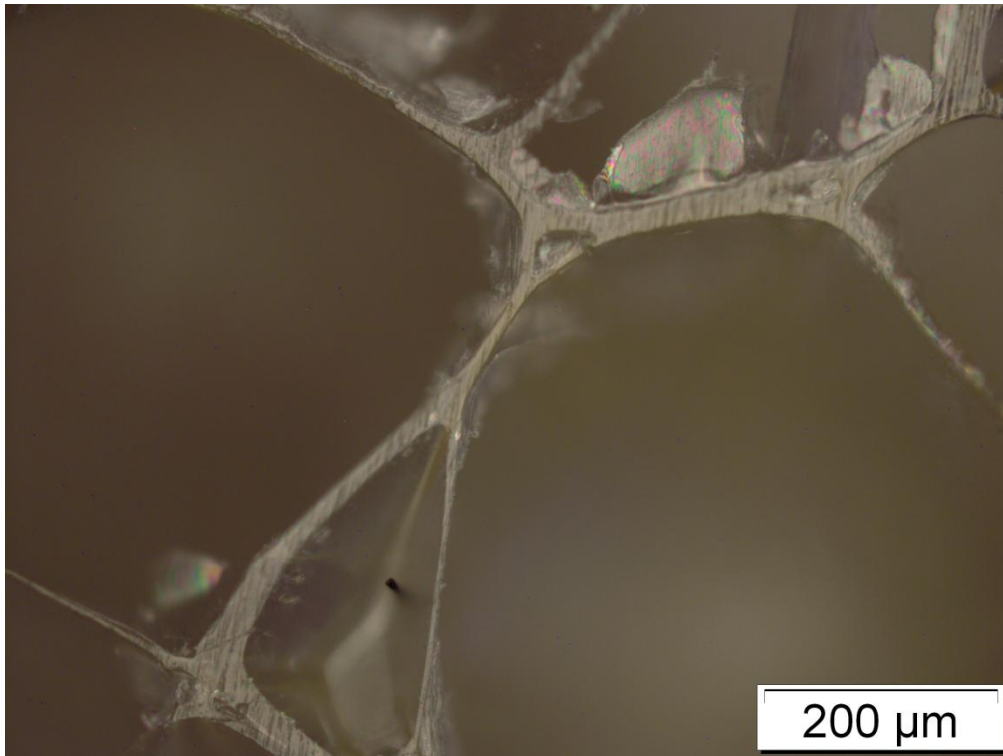


*Slika 30 - Uzorak 4 (povećanje 50x)*



*Slika 31 - Uzorak 4 (povećanje 100x)*





*Slika 32 - Uzorak 4 (povećanje 200x)*

#### **4.5. Statičko-vlačno ispitivanje uzoraka**

Norma ISO 527-4:1997 propisuje način izrezivanja uzoraka za statičko vlačno ispitivanje. Slika 33 prikazuje epruvetu za potrebe ovog ispitivanja. Epruvete su pravokutnog presjeka.

Dimenzije epruvete:

$L_3$  – ukupna dužina 150 mm

$L_0$  – početna mjerna duljina epruvete  $50 \pm 0,5$  mm

$L$  – udaljenost između čeljusti  $115 \pm 1$  mm

$R$  – radijus 60 mm

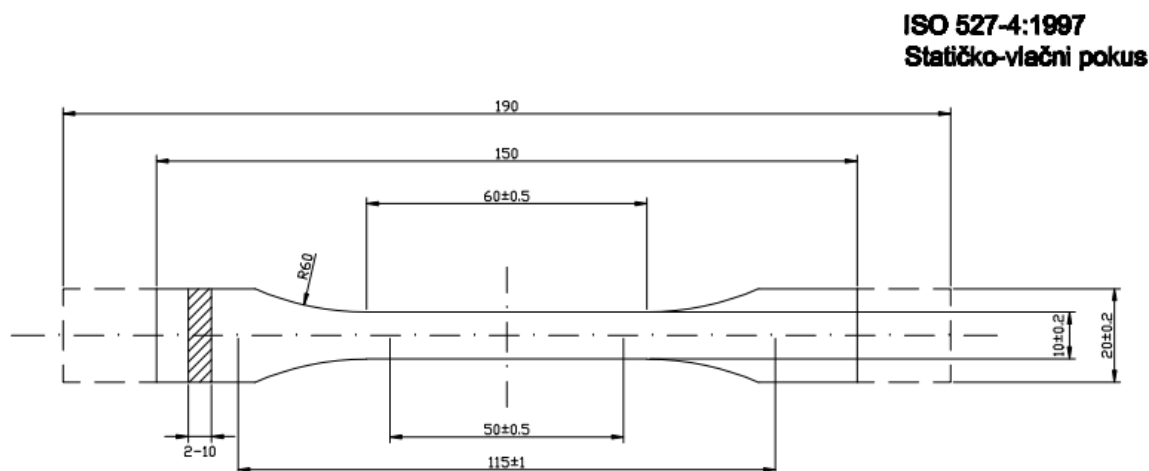
$b_1$  – početna širina epruvete  $10 \pm 0,2$  mm

$b_2$  – širina krajeva epruvete  $20 \pm 0,2$  mm

$h$  – debljina 2 – 10 mm

$S_0$  – ploština početnog presjeka epruvete,  $\text{mm}^2$

$L_3$  – ukupna dužina kod nekih materijala može biti i 200 mm, tako su i u ovom slučaju izvedene epruvete dužine 190 mm, da ne dolazi do klizanja i pucanja epruveta unutar čeljusti.



Slika 33 - Epruveta za statičko-vlačni pokus

Prema normi ISO 527-4:1997, za svaki uzorak je pripremljeno po sedam epruveta za statičko vlačno ispitivanje. Na univerzalnoj kidalici u Laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje provedeno je statičko vlačno ispitivanje i određena su sljedeća mehanička svojstva: vlačna čvrstoća,  $R_m$ ; maksimalna sila,  $F_m$ ; te modul elastičnosti  $E$ . Ispitivanje je provedeno na kidalici proizvođač WPM, Njemačka; vrsta: EU 40mod koja u potpunosti omogućava provođenje ispitivanja i registriranje rezultata, slika 34. Računalom upravljana, modernizirana verzija kidalice je umjerena u mjernom području od 4 kN do 400 kN. Vrsta softvera koji obrađuje dobivene podatke TIRA – test system. Također je korišten ekstenziometar proizvođača MF, vrsta MFA, serijskog broja 012872.

Za postavljanje parametara na kidalici bilo je potrebno ispitati po dvije epruvete od uzoraka 1 i 2, te po dvije epruvete od uzoraka 3 i 4.

Istezljivost  $A$  nije prikazana jer je bila manja od 1%.

Modul elastičnosti se izračunava prema izrazu: — —



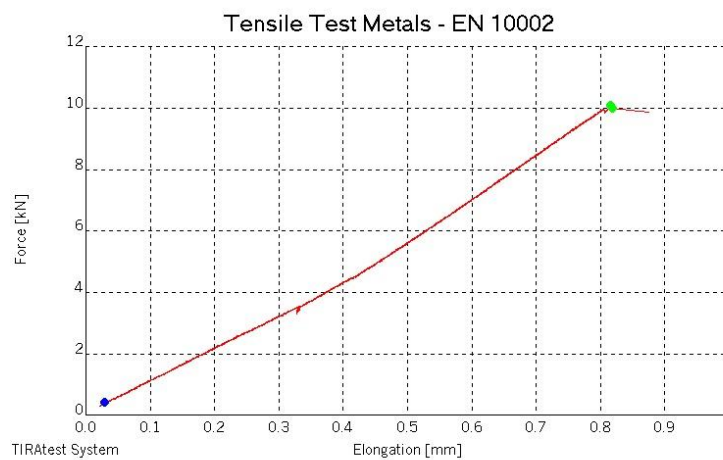
*Slika 34 - Uređaj za statičko-vlačno ispitivanje (WPM - EU 40)*

Na slici 35 se može vidjeti uzorak 3 spreman za ispitivanje s ekstenziometrom za mjerenje produljenja.

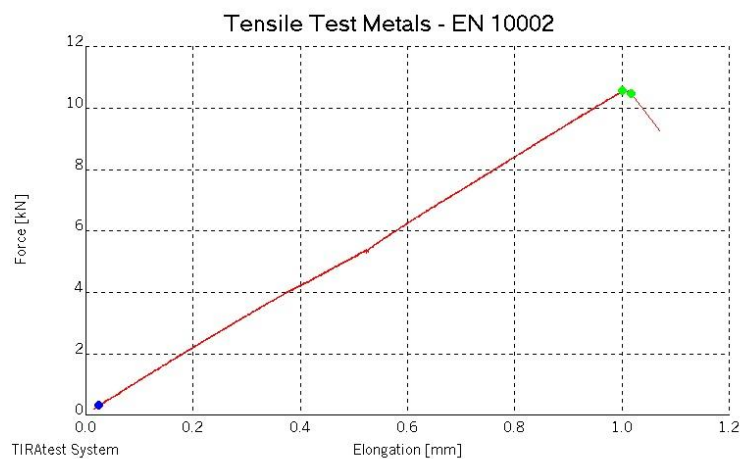


*Slika 35 – Uzorak 3*

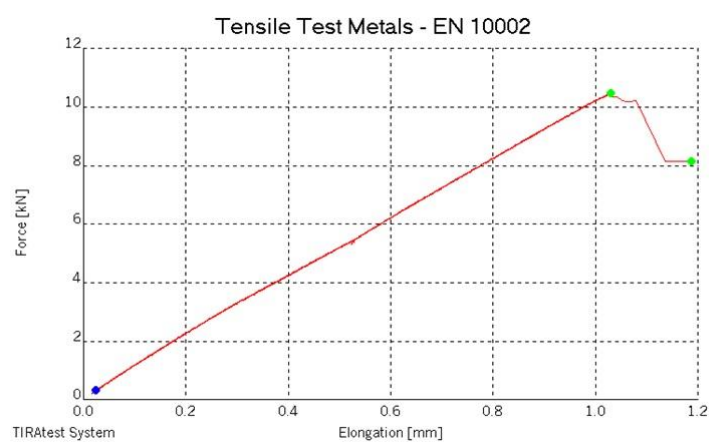
Rezultati ispitivanja su prikazani na sljedećim dijagramima i pratećim tablicama



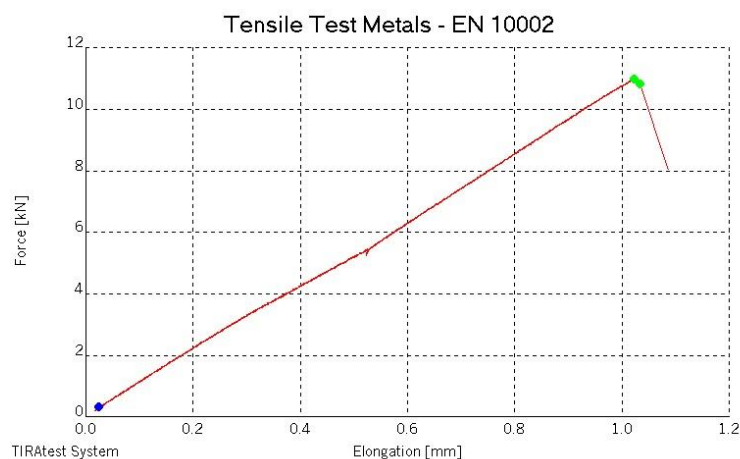
*Slika 36 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.3*



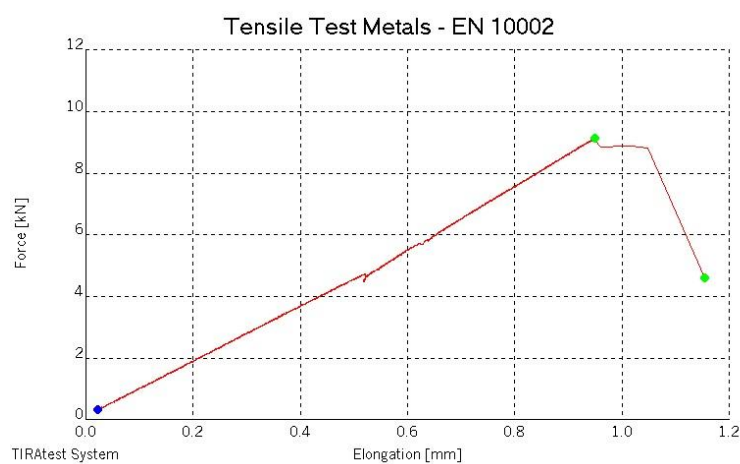
*Slika 37 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.4*



*Slika 38 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.5*



Slika 39 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.6

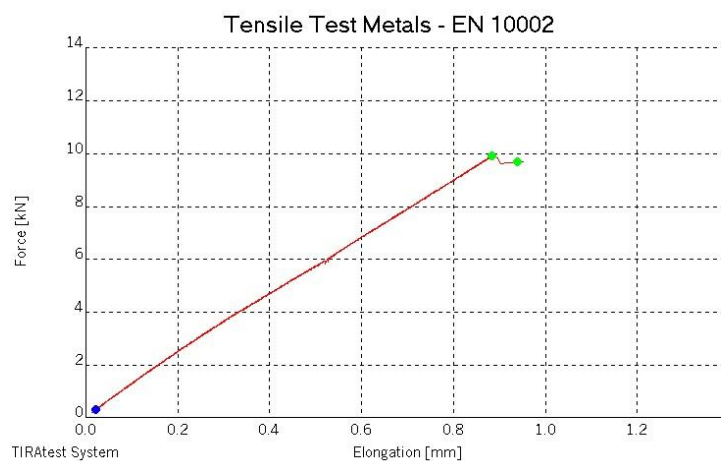
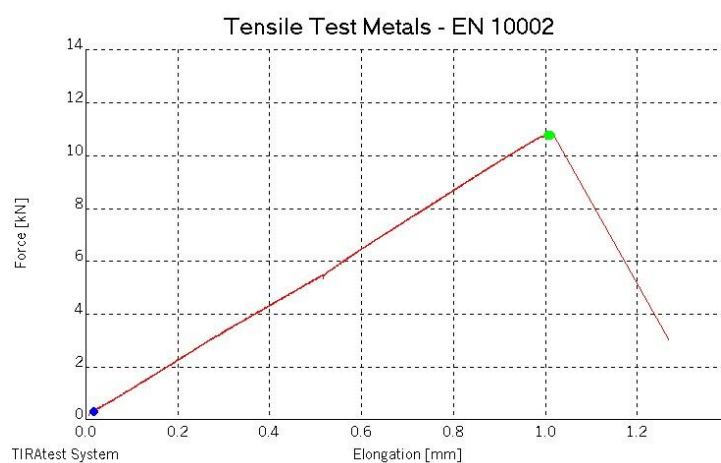
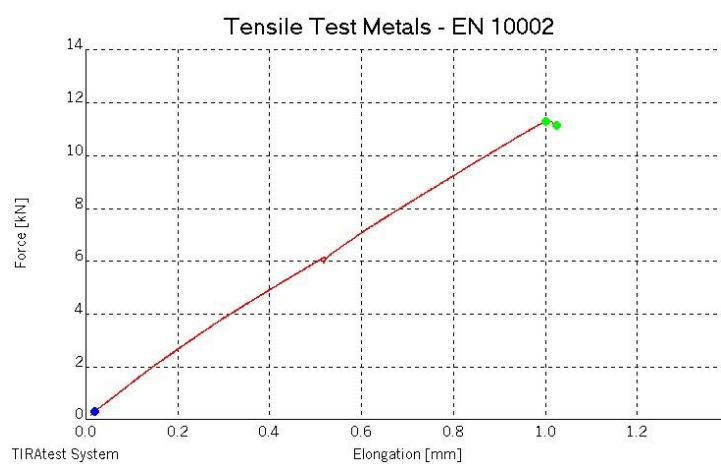


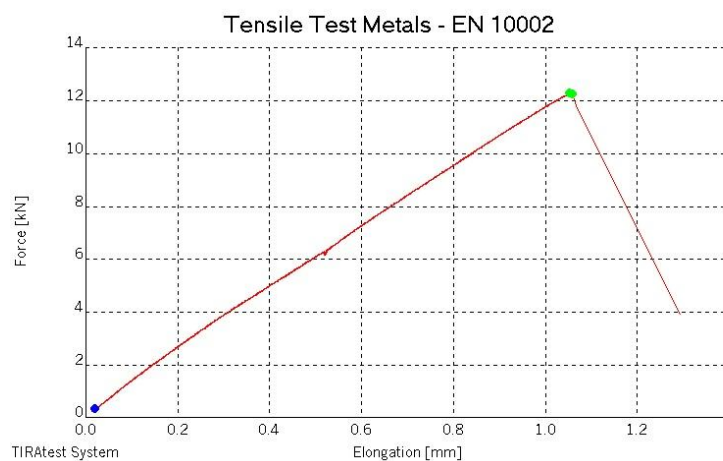
Slika 40 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 1 epr.7

Tablica 1 - Rezultati ispitivanja za uzorak 1:

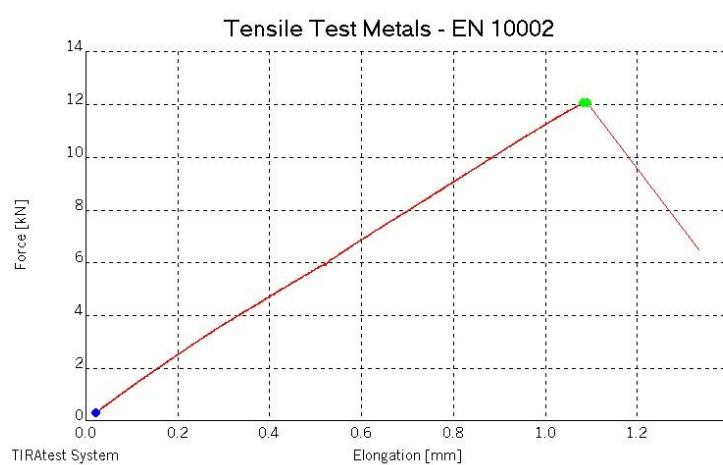
Uzorak 1	$R_m, \text{N/mm}^2$	$F_m, \text{N}$	$S_0, \text{mm}^2$	$E, \text{N/mm}^2$
1.	194	10 074	51,84	11 995
2.	206	10 553	51,30	10 285
3.	206	10 469	50,85	10 294
4.	217	10 974	50,60	10 844
5.	199	9 119	45,92	10 793



*Slika 41 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.3**Slika 42 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.4**Slika 43 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.5*



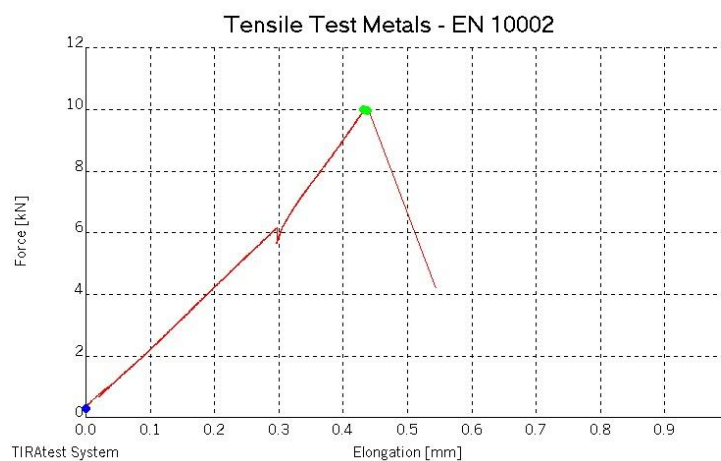
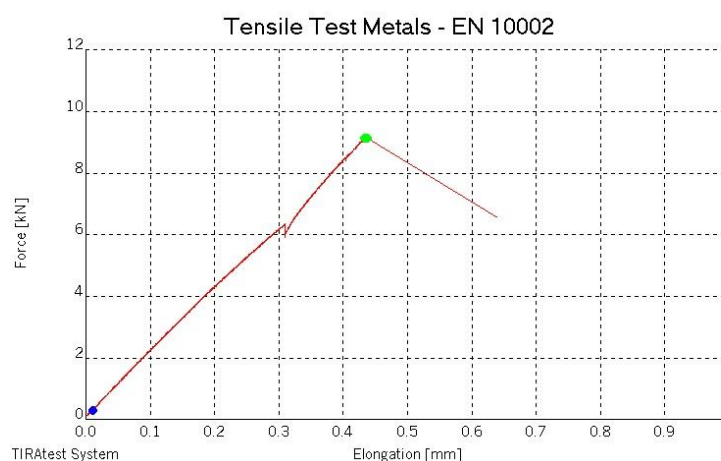
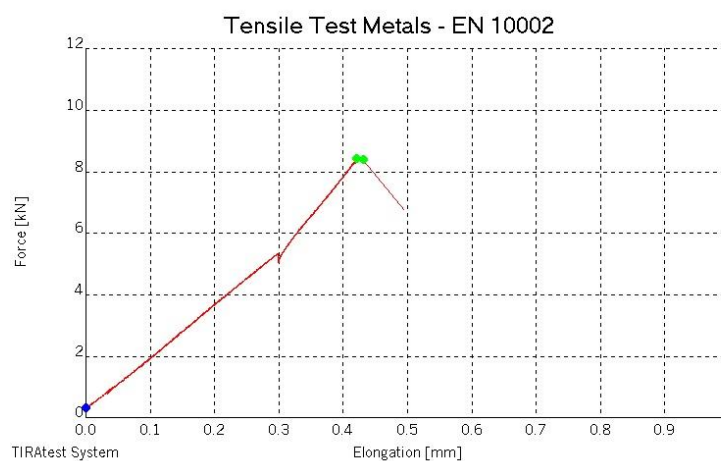
Slika 44 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.6

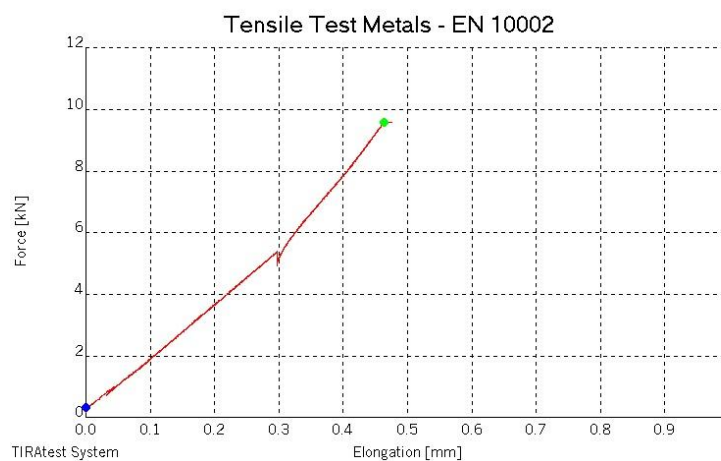


Slika 45 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 2 epr.7

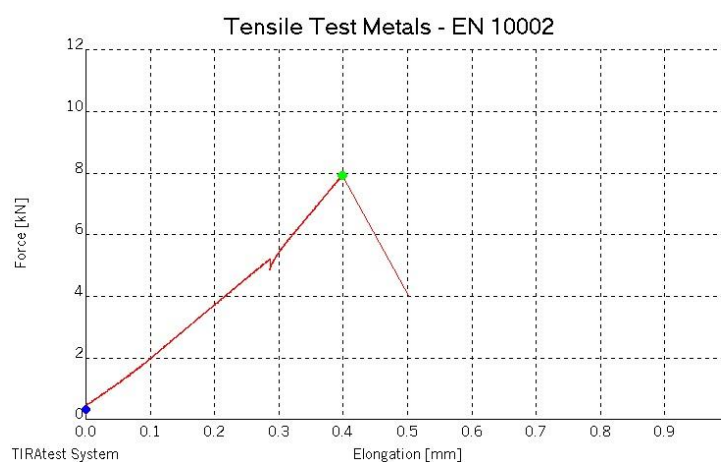
Tablica 2 - Rezultati ispitivanja za uzorka 2:

Uzorak 1	$R_m, \text{N/mm}^2$	$F_m, \text{N}$	$S_0, \text{mm}^2$	$E, \text{N/mm}^2$
1.	196	9 896	50,40	11 156
2.	212	10 772	50,74	10 615
3.	226	11 300	49,98	11 304
4.	222	12 280	55,44	10 547
5.	242	12 068	49,90	10 992

*Slika 46 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.3**Slika 47 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.4**Slika 48 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.5*



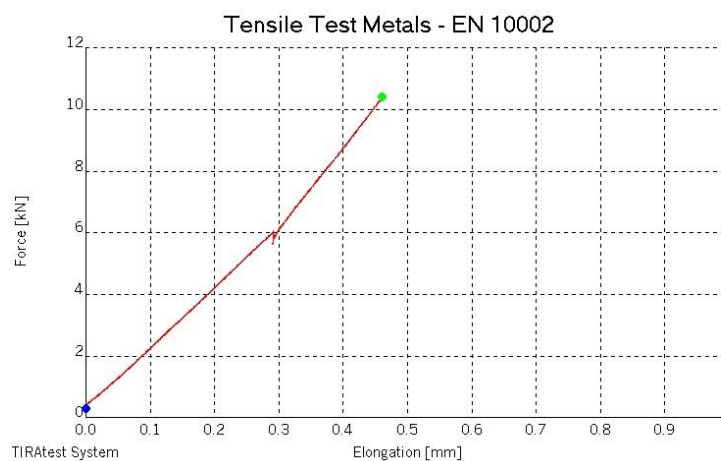
Slika 49 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.6



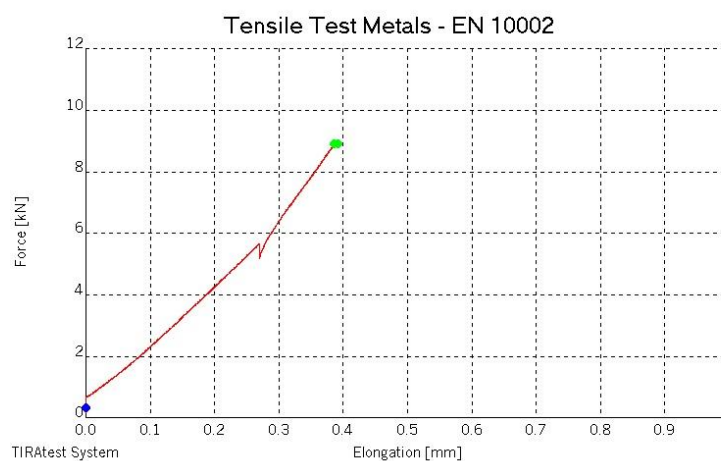
Slika 50 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 3 epr.7

Tablica 3 - Rezultati ispitivanja za uzorka 3:

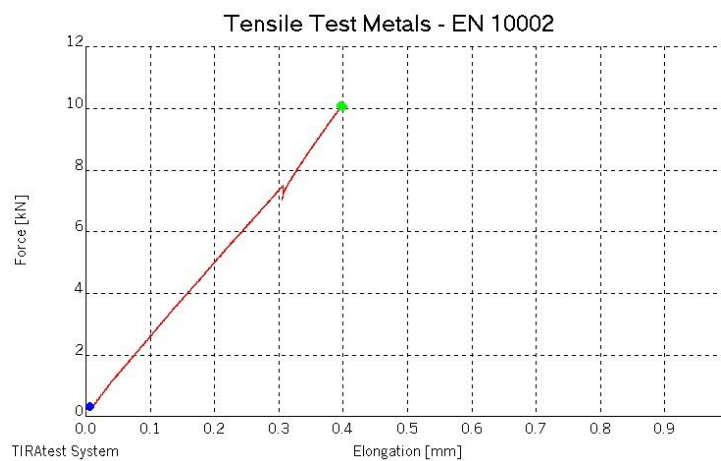
Uzorak 1	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	F <sub>m</sub> , N	S <sub>0</sub> , mm <sup>2</sup>	E, N/mm <sup>2</sup>
1.	104	9 982	95,76	11 582
2.	101	9 140	90,72	11 194
3.	94	8 422	89,46	10 460
4.	108	9 574	89,04	11 947
5.	85	7 902	93,24	10 593



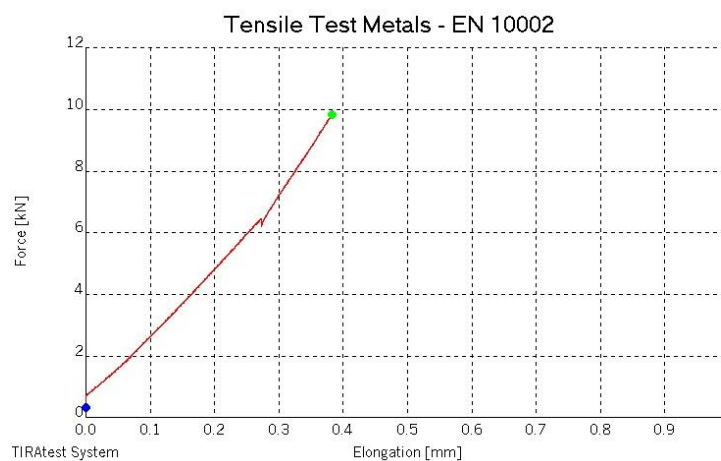
Slika 51 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.3



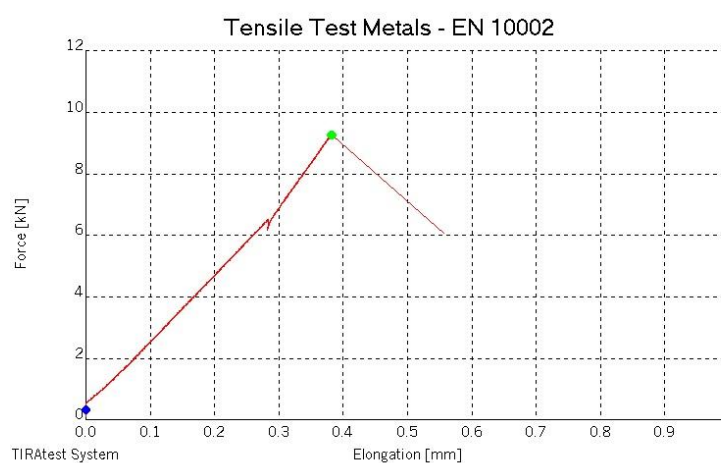
Slika 52 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.4



Slika 53 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.5



Slika 54 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.6



Slika 55 - Dijagram naprezanje-istezanje za uzorak 4 epr.7

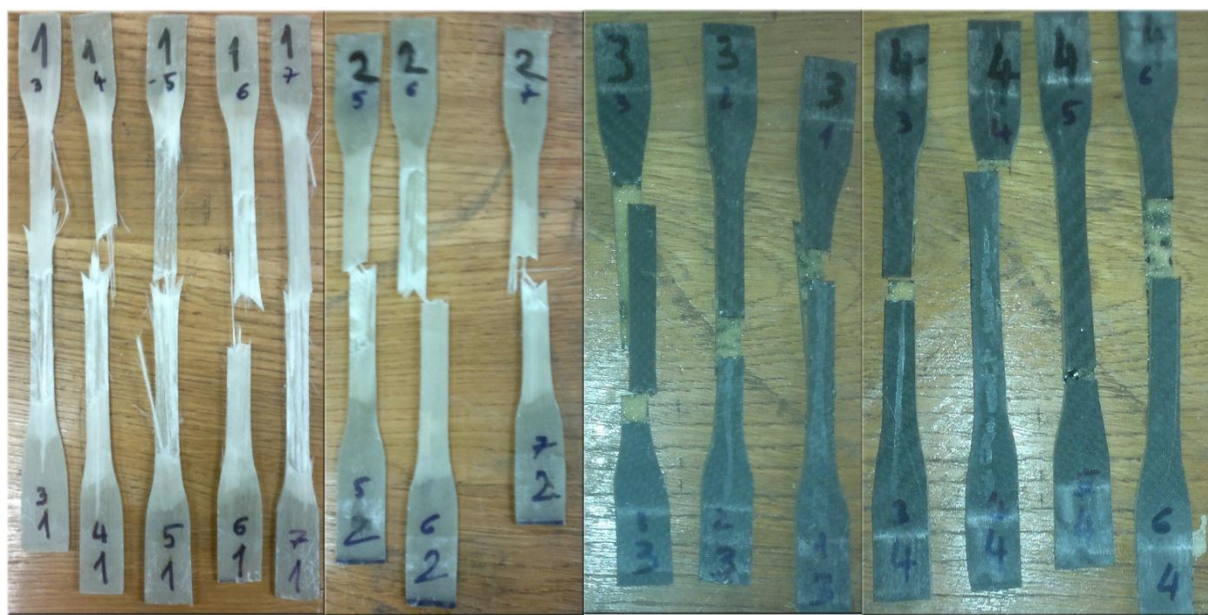
Tablica 4 - Rezultati ispitivanja za uzorka 4:

Uzorak 1	$R_m, \text{N/mm}^2$	$F_m, \text{N}$	$S_0, \text{mm}^2$	$E, \text{N/mm}^2$
1.	92	10 404	112,53	10 273
2.	86	8 898	103,23	11 050
3.	97	10 077	104,16	12 093
4.	91	9 842	108,10	11 980
5.	86	9 260	107,64	11 625

Iz pregleda rezultata u gornjim tablicama može se zaključiti da rezultati dobiveni za uzorke 1 i 2 odnosno 3 i 4 su skoro jednaki, razlog tome su brojni uzroci. Prije ispitivanja valjalo bi provjeriti kvalitetu izrade svake epruvete za statičko-vlačni pokus. Epruvete bi trebale biti strojno obrađivane na CNC stroju, a ne kao u ovom slučaju ručno. Prilikom ručne obrade epruveta velika je vjerojatnost da će nastati zarezi na samim epruvetama što dovodi do pogrešnih rezultata. Osim toga, bilo bi dobro izraditi više epruveta za ispitivanje. U ovom radu je korišteno svega sedam epruveta od čega su po dvije od svakog uzorka korištene za namještanje parametara. Nadalje, statičko-vlačni pokusi provedeni su na kidalici iz laboratorija za ispitivanje metala, čija je mjerna preciznost ograničena. Kidalica je umjerena u mjernom području od 4 kN do 400 kN, a sami rezultati su u području od 9 kN do 12 kN.

Kod uzoraka 3 i 4 hvatište epruvete se trebalo modificirati zbog nemogućnosti stavljanja u klješta za prihvata na kidalici što također može biti uzrok pogrešnih rezultata.

Na sljedećoj slici se mogu vidjeti epruvete nakon ispitivanja.



*Slika 56 – Epruvete nakon ispitivanja*

#### 4.6. Usporedba cijene i mase uzoraka

Cijena je jako važan faktor pri gradnji novih odnosno popravku postojećih brodova. U tablici 5 možemo vidjeti odnos cijena i mase uzoraka.

Cijena:

- Poliester FSN 0850/AMT/E (smola) 25 kn/kg
- Vinilester-sirester VE 45-M-90/AT (smola) 50 kn/kg
- Epoxy west system 105 (smola) 180 kn/kg
- Ugljična vlakna 400gr 152 kn/m<sup>2</sup>
- Powder mat 1M-300-125 8,34 kn/m<sup>2</sup>
- Biaxial EBX 600gr 16,80 kn/m<sup>2</sup>
- Termant (Ekspandirani PVC-Corex C70 55, 5 mm) 60 kn/m<sup>2</sup>

Tablica 5 - Usporedba mase i cijene uzoraka:

Uzorak	Cijena, kn/m <sup>2</sup>	Masa, kg/m <sup>2</sup>
1	170	6,4
2	270	6,4
3	680	1,9
4	1030	1,9



## 5. ANALIZA REZULTATA

### 5.1. Analiza mikrostrukture

Analizom mikrostrukture uzoraka 1 i 2 se mogu vidjeti zaostali mjehurići zraka. Mjehurići zraka su posljedica proizvodnje uzoraka ručnim dodirnim postupkom. Jedan od načina spriječavanja nastanka mjehurića je postupak proizvodnje uzoraka *Vakuum – infuzijom*.

Kod uzoraka 3 i 4 prilikom makroskopske analize je vidljiva heterogenost strukture. Ovakva struktura je posljedica postupka izrade. Kod sendvič konstrukcija gdje se kao punilo koristi termant (ekspandirani PVC), a epoxy smola kao matrica dijelove je potrebno izrađivati postupkom *Vakuum – infuzije*. Postupkom vakuum infuzije se postiže vakuum prilikom izrade dijelova što za posljedicu ima izvlačenje viška smole iz proizvoda, te se postiže dovoljno velik pritisak na sam proizvod čime se poboljšava spajanje punila i ojačavala, u ovom slučaju ugljičnih vlakana.

### 5.2. Statičko-vlačni pokus

Analizom dobivenih rezultata statičko-vlačnim postupkom se može zaključiti da usporedbom dobivenih rezultata između uzoraka 1 i 2, odnosno 3 i 4 nema većih odstupanja u rezultatima iako su korištene različite matrice.

Usporedbom vrijednosti mehaničkih svojstava prema literaturi razlika svojstava između vinilesterske i poliesterske smole je značajno veća. Vinilesterska smola ima bolje vrijednosti u vlačnoj čvrstoći oko 46% te oko 18% u modulu elastičnosti. [2]

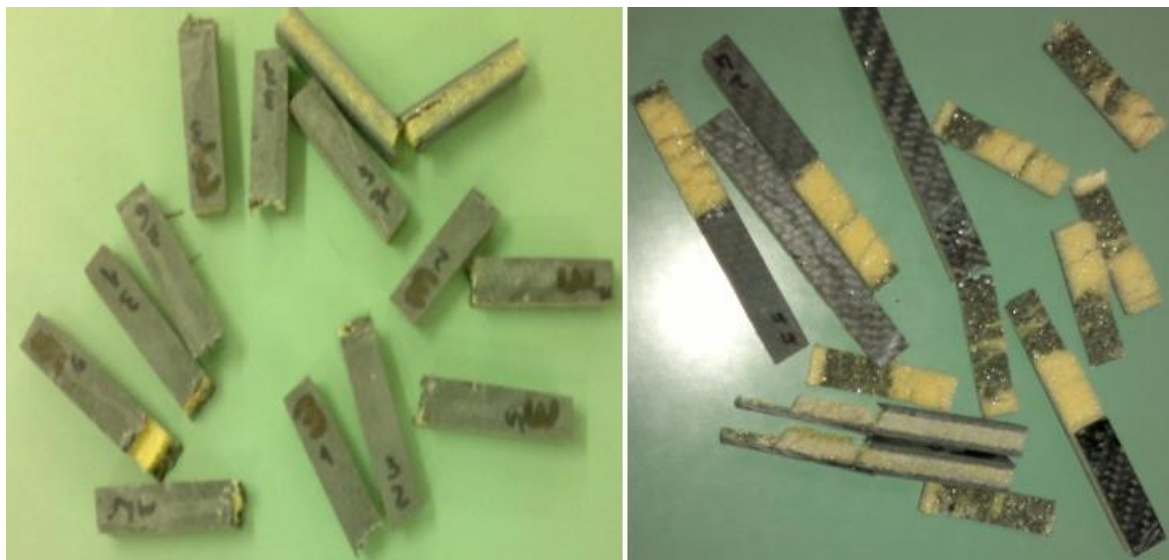
U tablici 6 su prikazane srednje vrijednosti modula elastičnosti te vlačne čvrstoće za sva četiri uzorka.

Tablica 6 – Usporedba mehaničkih svojstava:

	Rm, N/mm <sup>2</sup>	E, N/mm <sup>2</sup>
UZORAK 1	204,4	10 842
UZORAK 2	219,6	10 922
UZORAK 3	98,4	11 155
UZORAK 4	90,4	11 404

Uzroci ovakvih rezultata kako je gore navedeno su nedovoljna točnost prilikom izrezivanja uzoraka, mali broj epruveta za ispitivanje, te mjerna preciznost kidalice.

Na sljedećoj slici se mogu vidjeti prijelomne površine uzoraka 3 i 4 gdje je vidljivo da je kod uzorka 3 došlo do znatno boljeg spajanja elemenata kompozita u odnosu na uzorak 4.



Slika 57 - Prijelomna površina uzoraka 3 i 4

### 5.3. Osvrt na usporedbu cijene i mase

Uspoređujući mase uzoraka možemo vidjeti da uzorci 3 i 4 koji su napravljeni kao sendvić konstrukcija imaju oko 70% manju masu u odnosu na uzorke 1 i 2. Uzorci 3 i 4 kao ojačanja koriste ugljična vlakna i zbog toga su znatno skuplji (tri puta pa i više).

Kod brzih brodova sendvič materijali posebno su zanimljivi zbog smanjenja mase što rezultira većom brzinom plovila, povećanjem nosivosti, te smanjenjem potrošnje goriva. Sendvič materijali imaju povišenu krutost što smanjuje potrebu za podupiranjem, a time doprinose fleksibilnosti prostora. Ovi materijali imaju povišenu dinamičku izdržljivost, otporniji su na udarna opterećenja, a uslučajevima kada su komponente kemijski postojane, kemijski je postojana i sendvič konstrukcija.

## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju ispitivanja provedenih u cilju karakterizacije kompozitnih materijala, i pri tom dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Analiza mikrostrukture pokazala da u mikrostrukтури postoje zaostali mjehurići zraka, koji su posljedica postupka proizvodnje. Također analizom uzoraka 3 i 4 može se vidjeti heterogenost strukture, odnosno raslojavanje između površinskog sloja i jezgre.
- Analizom rezultata statičko-vlačnog pokusa se može vidjeti da svi uzorci imaju približno jednake vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti.
- Usporedbom cijena dolazimo do zaključka da su uzorci 1 i 2 znatno isplativiji u odnosu na uzorke 3 i 4. No usporedbom mase istih uzoraka vidi se prednost sendvič konstrukcije. Primjenom ugljičnih vlakana kao površinskog sloja uzorci 3 i 4 su postali znatno skuplji u odnosu na uzorke 1 i 2. Korištenjem staklenog ojačanja u površinskom sloju i ručnog dodirnog postupka proizvodnje cijena sendvič konstrukcija bi se znatno smanjila.

Uzorci napravljeni kao sendvič konstrukcija imali bi znatno bolja mehanička svojstva da su napravljeni postupkom vakuum-infuzije. Ovaj postupak je znatno bolji zbog toga što se višak smole skuplja pomoću podtladne pumpe te se stvara podtlak kojim se poboljšava spajanje elemenata kompozita.

U brodogradnji se često susreću sendvič konstrukcije. Iako su ovi materijali postali nezaobilazni u konstrukcijama novih plovila znanje o sastavu, svojstvima i ispitivanjima ovih materijala je ostalo jako skromno.

Ovaj rad je imao za cilj stjecanje osnovnih spoznaja o planovima laminata te sendvič konstrukcijama za proizvodnju i popravke brodova i njihovoj povezanosti sa strukturom i svojstvima. Također se htjelo ukazati na potrebu produbljivanja znanja o tim materijalima tako da ovaj rad predstavlja preliminarna istraživanja u ovom značajnom području brodogradnje.

## 7. LITERATURA

- [1] <http://www.ffri.uniri.hr/~zvonimir/Materijali/08Kompoziti>
- [2] W. Kunej: Poliesterski kompoziti, 2. Prošireno izdanje, Zagreb, 2006.
- [3] M. Šercer: Predavanja – Prerada kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb, 2008./2009.
- [4] Tomislav Filetin: Materijali i tehnologijski razvoj, Zagreb, 2002.
- [5] Zdravko Schauperl: Kompozitni materijali, Scribd, 2009./2010.  
<http://www.scribd.com/doc/36204378/Kompoziti-skripta>
- [6] M. Vlahović: Diplomski rad, Proizvodnja kompozitnih tvorevina centrifugalnim lijevanjem, FSB, Zagreb, 2010.
- [7] I. Grubišić: Konstrukcija malih brodova, [www.fsb.hr/kmb](http://www.fsb.hr/kmb), 2005.
- [8] J. Indof, Đ. Španiček: Primjena sendvič konstrukcija na osnovi polimernih materijala u brodogradnji, XVI Symposium SORTA, 2004.
- [9] I. Juraga, I. Stojanović, T. Noršić: Zaštita broskoga trupa od korozije i obraštanja, FSB, UDC 620.193/.197.6:629.5.024, 2007.
- [10] W. Turnšek: Brodogradnja za amatere, Priručnici, Drvogradnja-epoksidi, [www.walterturnsek.t-com.hr](http://www.walterturnsek.t-com.hr), 2009.
- [11] G. Marić: Predavanja – Kompozitni materijali, FSB, Zagreb, 2012./2013.

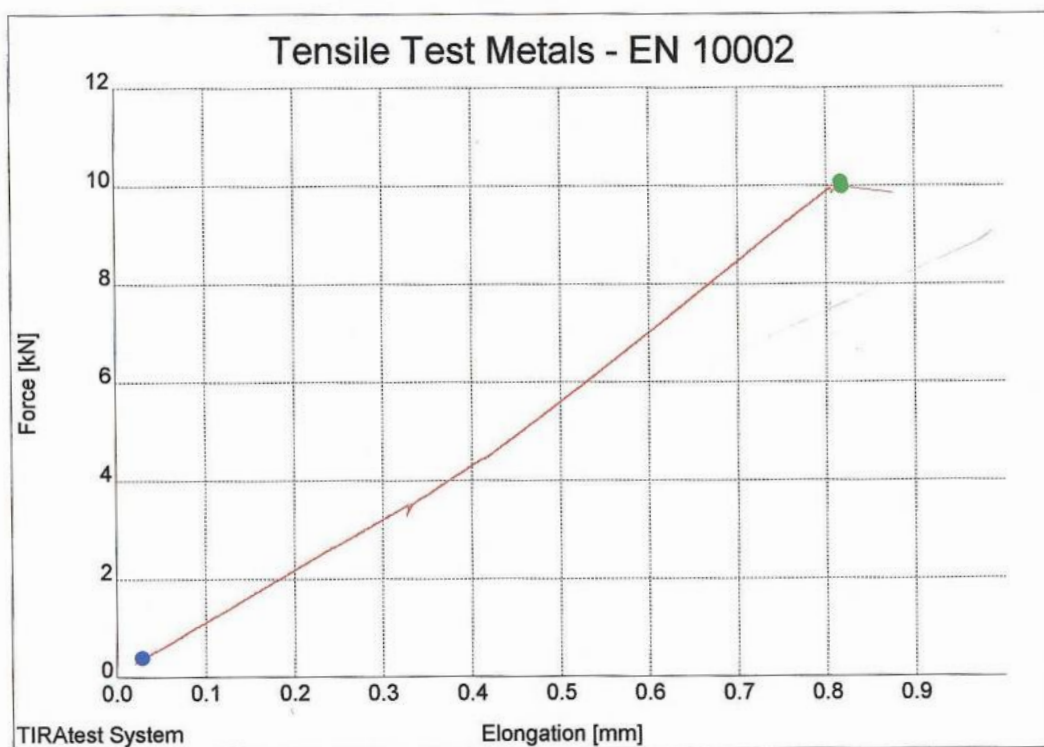
## **8. PRILOZI**

- I. Prilog 1 – Prikaz ispisa rezultata statičko-vlačnog ispitivanja za uzorak 1 epr.3
- II. Prilog 2 – Prikaz ispisa rezultata statičko-vlačnog ispitivanja za uzorak 2 epr.3
- III. Prilog 3 – Prikaz ispisa rezultata statičko-vlačnog ispitivanja za uzorak 3 epr.3
- IV. Prilog 4 – Prikaz ispisa rezultata statičko-vlačnog ispitivanja za uzorak 4 epr.3

Operator: Alan  
 Material:  
 Date: 12.11.2012  
 Time: 11:47  
 File name: C:\My Data\Ispitivanja\Sovulj uzorak 1 epr. 3 12.11.2012004.MVL

### Test parameters

Test: Tensile Test Metals - EN 10002  
 UTM type: EU 40 mod  
 Load cell: 400 kN  
 Extensometer: MFA 2  
 Sample dimensions: a = 4.67 mm; b = 11.1 mm  
 Length data: Lo = 50 mm; Le = 70 mm  
 Test rates: V0 = 2 mm/min; V1 = 1000 N/min  
 Rate switch points: F0 = 400 N  
 End of test criterions: dF = 50 %



	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm kN	Fb kN	S0 mm <sup>2</sup>
4	194	10.074	9.99	51.84

Prilog 1 – Prikaz ispisa rezultata statičko-vlačnog ispitivanja za uzorak 1 epr.3

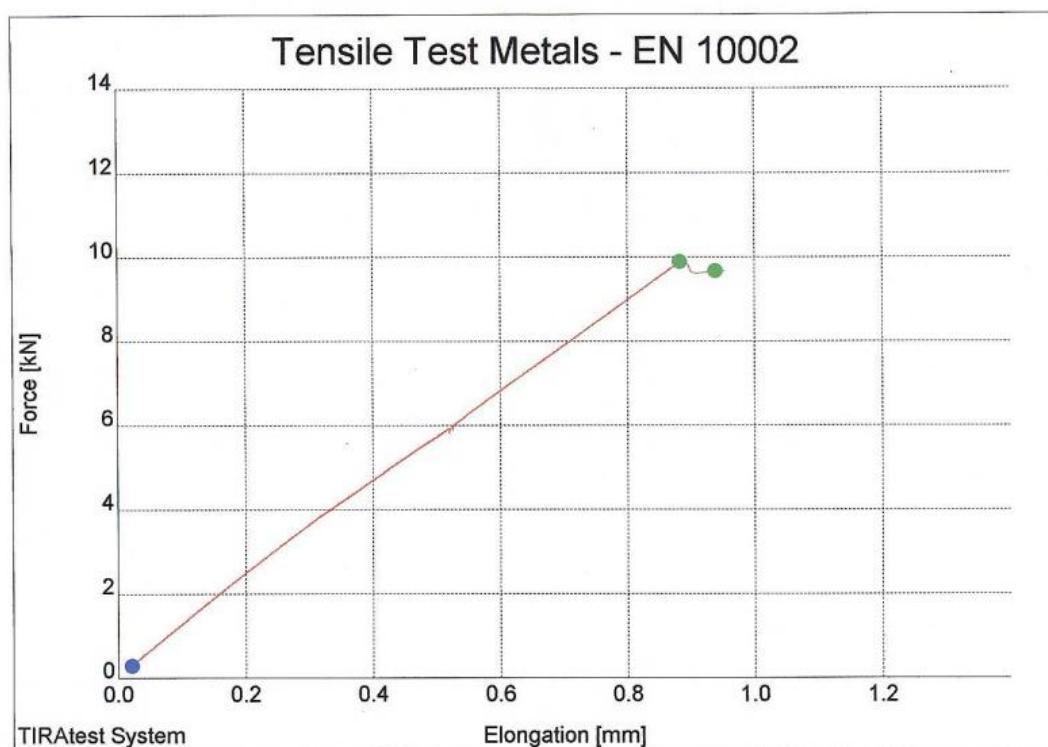
Operator: Alan  
 Material:  
 File name: C:\My Data\Ispitivanja\Sovulj uzorak 2 epr. 3 12.11.2012\001.MVL

Date: 12.11.2012

Time: 13:01

### Test parameters

Test: Tensile Test Metals - EN 10002  
 UTM type: EU 40 mod  
 Load cell: 400 kN  
 Extensometer: MFA 2  
 Sample dimensions: a = 4.2 mm; b = 12 mm  
 Length data: Lo = 50 mm; Le = 70 mm  
 Test rates: V0 = 2 mm/min; V1 = 2000 N/min  
 Rate switch points: F0 = 300 N  
 End of test criterions: dF = 50 %



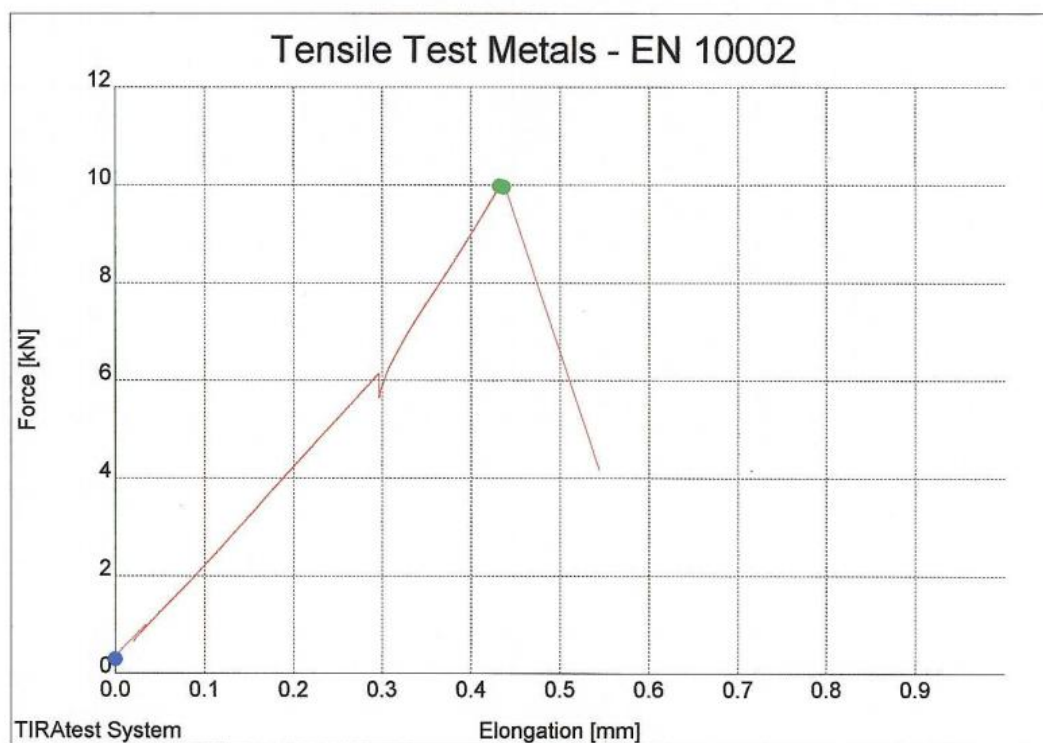
	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm kN	Fb kN	S0 mm <sup>2</sup>
1	196	9.896	9.68	50.40



Operator: Alan  
Material: Ugljična vlakna  
File name: C:\My Data\Ispitivanja\SOVULJ uzorak 3 epr. 3 13.11.2012\001.MVL

### Test parameters

Test:	Tensile Test Metals - EN 10002
UTM type:	EU 40 mod
Load cell:	400 kN
Extensometer:	MFA 2
Sample dimensions:	a = 8.4 mm; b = 11.4 mm
Length data:	Lo = 50 mm; Le = 70 mm
Test rates:	V0 = 2 mm/min; V1 = 2000 N/min
Rate switch points:	F0 = 300 N
End of test criteria:	dF = 50 %



	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm kN	Fb kN	S0 mm <sup>2</sup>
1	104	9.982	9.97	95.76

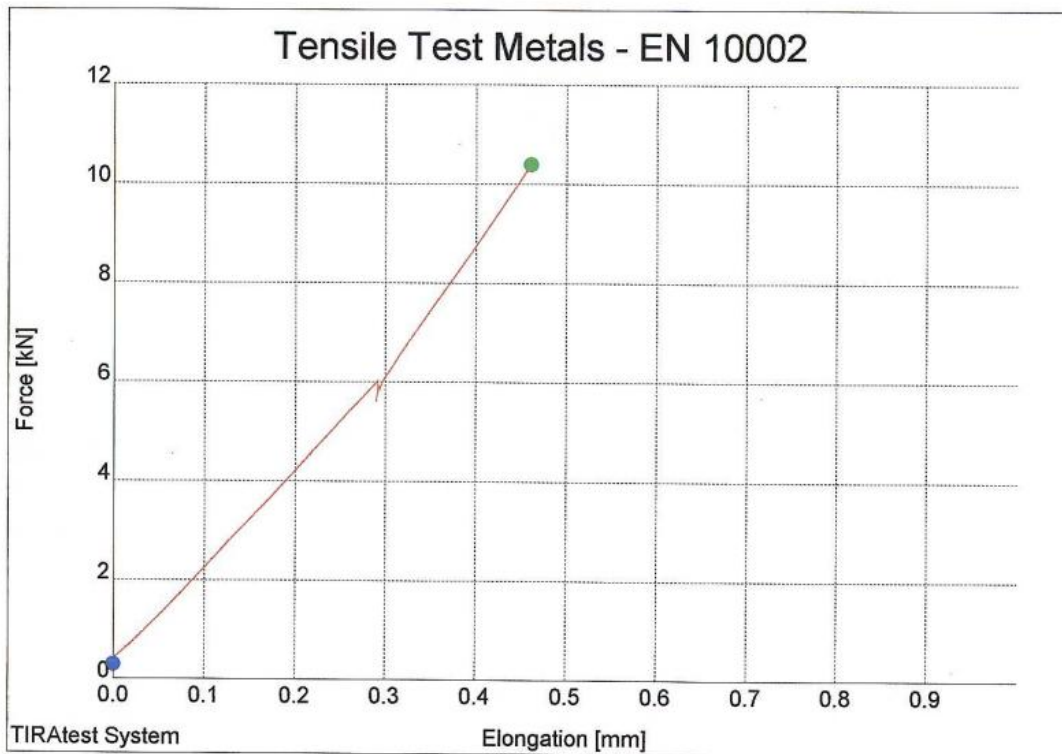
Operator: Alan  
 Material: Ugljicna vlakna  
 File name: C:\My Data\Ispitivanja\Sovulj uzorak 4 epr. 3 13.11.2012002.MVL

Date: 13.11.2012

Time: 11:16

### Test parameters

Test: Tensile Test Metals - EN 10002  
 UTM type: EU 40 mod  
 Load cell: 400 kN  
 Extensometer: MFA 2  
 Sample dimensions: a = 9.3 mm; b = 12.1 mm  
 Length data: Lo = 50 mm; Le = 70 mm  
 Test rates: V0 = 2 mm/min; V1 = 2000 N/min  
 Rate switch points: F0 = 300 N  
 End of test criteria: dF = 50 %



	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm kN	Fb kN	S0 mm <sup>2</sup>
2	92	10.404	10.40	112.53